



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

NÁVRH PÁJECÍ STANICE PRO REBALLING BGA POUZDER

DESIGN OF REFLOW SOLDERING STATION FOR REBALLING OF BGA PACKAGES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Janiš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Alexandr Otáhal

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Adam Janiš

ID: 186100

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Návrh pájecí stanice pro reballing BGA pouzder

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s procesem reballing u BGA pouzder. Nastudujte a popište danou problematiku se zaměřením na konstrukci zařízení pro pájení přetavením kulových pájkových vývodů. Dopracujte konstrukci navrženého pájecího zařízení pro proces reballing BGA pouzder, které jste navrhnul ve své semestrální práci. Experimentálně ověřte funkci tohoto zařízení. Následně potvrďte správnost simulačního modelu ze získaných výsledků měření teploty na několika místech uvnitř pájecí stanice. Výsledky své práce popište a vyhodnoťte v bakalářské práci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5. 2. 2018

Termín odevzdání: 31. 5. 2018

Vedoucí práce: Ing. Alexandr Otáhal




doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem pájecí stanice pro reballing pouzder BGA v ochranné dusíkové atmosféře. Jsou v ní přiblíženy principy pájení přetavením, výhody ochranné dusíkové atmosféry na kvalitu výsledného pájeného spoje a popsány typy pájecích zařízení. U pouzder s kulovými vývody (BGA) je uvedena jejich charakteristika, způsob montáže, proces oprav a inspekce kvality zapájení. Experimentální část obsahuje návrh zařízení, teplotní simulace šíření tepla a zejména jsou v ní popsány použité konstrukční prvky a princip funkce jednotlivých částí zařízení. Na závěr této práce byla provedena měření pájecího procesu a ověřena schopnost zapájení vzorku.

KLÍČOVÁ SLOVA

pájení přetavením, teplotní profil, dusíková atmosféra, BGA, znovuvytvoření kulových pájkových vývodů

ABSTRACT

This thesis deals with the design of a soldering oven for BGA reballing in a nitrogen protective atmosphere. The principles of reflow soldering, the advantages of a nitrogen protective atmosphere on the quality of solder joints and the types of soldering devices are described. The BGA packages' part consists of their characteristics, assembling methods, a rework and repair process and solder joint inspection methods. Design of the device, as well as heat flow simulations, are included in the experimental part and particularly it also describes the used structural elements and the principle of function of the individual parts of the device. At the end of this work, the soldering process was measured and the ability of the sample soldering was verified.

KEYWORDS

reflow soldering, soldering profile, nitrogen protective atmosphere, BGA, reballing

JANIŠ, A. *Návrh pájecí stanice pro reballing BGA pouzder*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2018. 51 s., 1 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Alexandr Otáhal.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh pájecí stanice pro reballing BGA pouzder jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Alexandru Otáhalovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	8
1 Pájení	9
1.1 Pájení SMT součástek přetavením.....	9
1.2 Teplotní profil	9
1.3 Pájení v ochranné dusíkové atmosféře.....	11
1.4 Výhody dusíkové atmosféry	12
2 Pouzdra BGA – Ball grid array	13
2.1 Základní charakteristika.....	13
2.2 Montáž	14
2.3 Ověření kvality pájeného spoje.....	14
2.4 Reballing	14
3 Pájecí zařízení	18
3.1 Průtažné pece	18
3.2 Vsázkové přetavovací pece.....	19
3.3 Pájecí pece pro reballing BGA pouzder	19
4 Experimentální část	21
4.1 Návrh pájecího zařízení	21
4.1.1 Vnější a propojovací část.....	22
4.1.2 Chladicí část.....	26
4.1.3 Ohřevná a stínící část.....	28
4.2 Teplotní simulace přenosu tepla	29
4.3 Konstrukční část	33
4.3.1 PMMA box	33
4.3.2 Ohřevná část	34
4.3.3 Stínění	35
4.3.4 Chladicí sestava	36
4.3.5 Vakuové průchodky	37

4.4	Funkce zařízení	39
4.4.1	Ověření teplotních simulací	39
4.4.2	Ověření funkčnosti – zapájení vzorku	42
4.4.3	Čerpání pracovního prostoru	44
5	Závěr	45
	Literatura	46
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	48
	Seznam obrázků	49
	Seznam tabulek	51
A	Blokové schéma zapojení elektrického a chladicího okruhu	52

ÚVOD

Pájení je nezbytnou součástí elektrotechnické výroby, kde slouží k mechanickému a elektrickému propojení elektronických součástek a desek plošných spojů nebo jiných základních materiálů. Již od počátku výroby elektronických zařízení je přítomna stále trvající snaha o miniaturizaci, což v tomto oboru přináší mnohé výzvy. Díky tomuto trendu se vyvíjejí stále menší a prostorově úspornější pouzdra pro integrované obvody jako BGA, CSP a další. Uvedení těchto pouzder na trh doprovázela nedůvěra k jejich uspokojivému připájení na substráty a následná kontrola. Jak se ale později ukázalo, jakmile jsou správně nastaveny pracovní parametry pájecího procesu, jsou výsledné spoje kvalitní a snadno reprodukovatelné.

Nevýhodou pramenící z kulových vývodů umístěných na spodní straně pouzder BGA a CSP je hlavně potřeba tyto pájkové kuličky při procesu rework vždy odstranit a nahradit novými. Tento proces je nezbytný z několika důvodů, z nichž nejdůležitějším je možnost poškození vývodů při odpájení pouzdra ze substrátu. Dále také při opakovaném průchodu pájecím procesem dochází k dalšímu nárůstu vrstev intermetalických sloučenin, které se vyznačují především vyšší teplotou tavení a při větším množství ve spoji zhoršují jeho mechanické a elektrické vlastnosti.

Je žádoucí zdokonalit proces reballingu tak, aby pouzdra nebyla zbytečně a opakovaně vystavována vysokým teplotám. V elektrotechnické výrobě se stále více uplatňují bezolovnaté pájecí slitiny. Ty sice vyhovují vydaným směrnícím, ale většinou potřebují pro správné přetavení vyšší teploty, a to přímo vede k obtížněji nastavitelnému pájecímu procesu, zejména z důvodu vyšší oxidace a teplotní odolnosti základních materiálů a pouzder. Často se z tohoto důvodu volí použití ochranné dusíkové atmosféry, která zlepšuje celkové vlastnosti pájeného spoje. Toho je docíleno dosažením přítomnosti co nejmenšího množství kyslíku při pájení, což vede k eliminaci oxidace pájených povrchů a pájky.

Na základě výše popsaných informací vznikla potřeba zkoumat vlastnosti bezolovnatých pájecích slitin z pohledu jejich jakosti a spolehlivosti. Pro tyto účely bylo nutné vytvořit experimentální zařízení s možností pájení v dusíkové ochranné atmosféře a za sníženého tlaku. Tato práce popisuje návrh, konstrukci a ověření funkčnosti takového zařízení s využitím teplotních simulací.

1 PÁJENÍ

Pájení je definováno jako spojování dvou nebo více kovů pomocí pájky. Tento proces je nezbytnou součástí elektrotechnické výroby, kde slouží zejména k upevňování součástek na desku plošných spojů, tzv. měkké pájení. Na rozdíl od svařování se spojované povrchy netaví, ale využívá se nízké teploty tavení použité pájky. Pájený spoj by se měl vyznačovat následujícími vlastnostmi: správné propojení součástek s deskou plošných spojů, dostatečná mechanická odolnost, vysoká a dlouhodobá spolehlivost, minimum parazitních vlastností a bez kontaktu s okolními ploškami a součástkami.

1.1 Pájení SMT součástek přetavením

Pájení přetavením je nejčastěji používaný způsob uchycení součástek pro povrchovou montáž na desku plošných spojů při sériové výrobě. Je to složitý proces s velkým množstvím parametrů, které je nutné vhodně nastavit a vybrat v závislosti na konkrétním výrobku a možnostech výrobce.

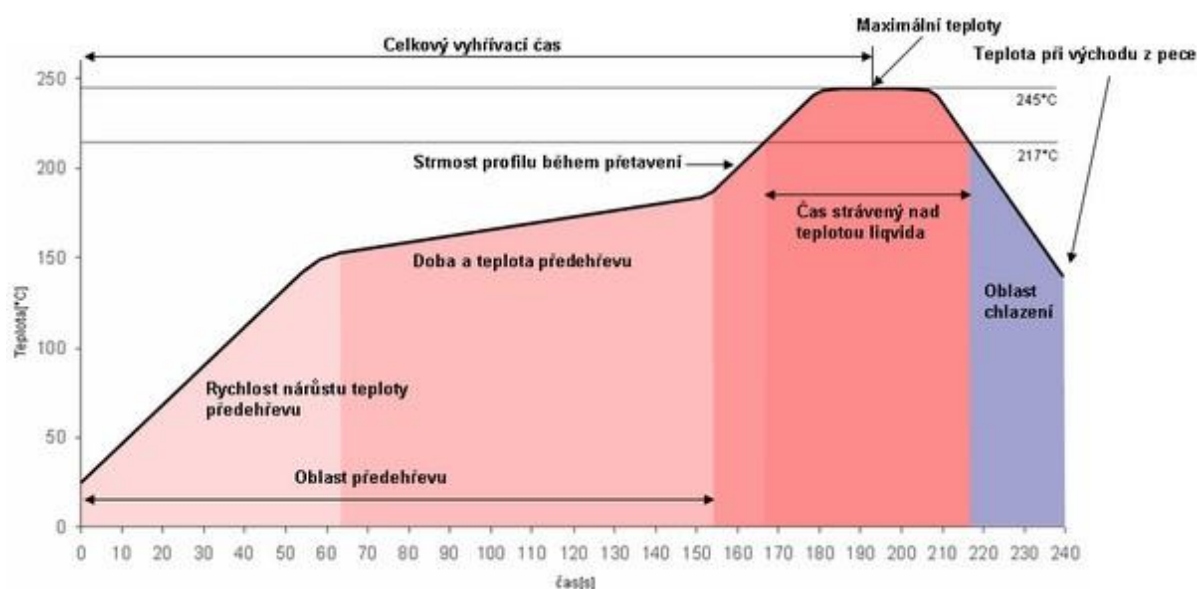
Při pájení přetavením se na požadované pájecí plošky na DPS nanese pájecí pasta. Ta sestává z tavidla a kovových kuliček o velikosti v řádech mikrometrů. Do natisknuté pasty se následně umístí součástky, ve velkovýrobě tuto činnost provádí osazovací automaty. Poté se deska umístí do přetavovací pece, kde je postupně vystavena předem stanoveným teplotám, během čehož se pájecí pasta přetaví a zchladnutím vytvoří pevný spoj mezi DPS a SMT součástkami. Aby byl tento proces úspěšný a výsledné pájené spoje byly funkční a spolehlivé, je potřeba správně nastavit teplotní profil.

1.2 Teplotní profil

Teplotní profil je grafickým znázorněním teplotního průběhu v závislosti na čase při pájení. Jeho přesné nastavení je nezbytné pro správné zapájení požadovaných spojů na desce plošných spojů. Při pájení v průtažných pecích se nastavují teploty jednotlivých zón, kterými deska se součástkami projíždí na dopravníku, oproti tomu u vsázkových pecí se reguluje teplota v celém objemu zařízení. Důležité faktory při volbě teplotních gradientů jednotlivých zón a jejich délky jsou typ ohřevu, množství a typ součástek, jejich barva a materiál, typ pájecí slitiny a velikost a složení desky.

Teplotní profil s vyrovnáním teploty pro pájecí pastu SAC305 je vidět na obrázku Obr. 1.1: V první části dochází k předehřevu sestavy určené k pájení s teplotním gradientem maximálně 3 °C/s pro bezolovnaté pájky. V této zóně se aktivují tavidla v pájecí pastě, která odstraňují oxidy z pájených povrchů, zabraňují další oxidaci

a napomáhají smáčení. Po přehřevu následuje oblast vyrovnání teplot celku. To je zejména důležité, pokud se na desce nachází více druhů součástek s rozdílnou tepelnou kapacitou nebo pokud pracujeme s DPS s většími rozměry. Pokud by se deska plošných spojů neohřála po obou stranách na stejnou teplotu, mohlo by dojít k její deformaci a případně i k prasknutí. Doba, kterou pájená sestava stráví ve vyrovnávací zóně, závisí také na způsobu ohřevu pájecí pece, kdy je např. značný rozdíl mezi infračerveným zářením, které ohřívá komponenty rozdílnou rychlostí v závislosti na jejich emisivitě, a nucenou konvekcí, která ohřívá sestavu rovnoměrněji. Po důkladném prohřátí přechází deska do zóny přetavení, ve které je zvolena maximální teplota přibližně o 20 °C vyšší, než je teplota tání pájky. Vyšší teplota kompenzuje nerovnoměrný tepelný odvod desky a kolísání teploty na pájených površích, které by mohlo ovlivnit výslednou kvalitu spojů na některých částech desky [1].

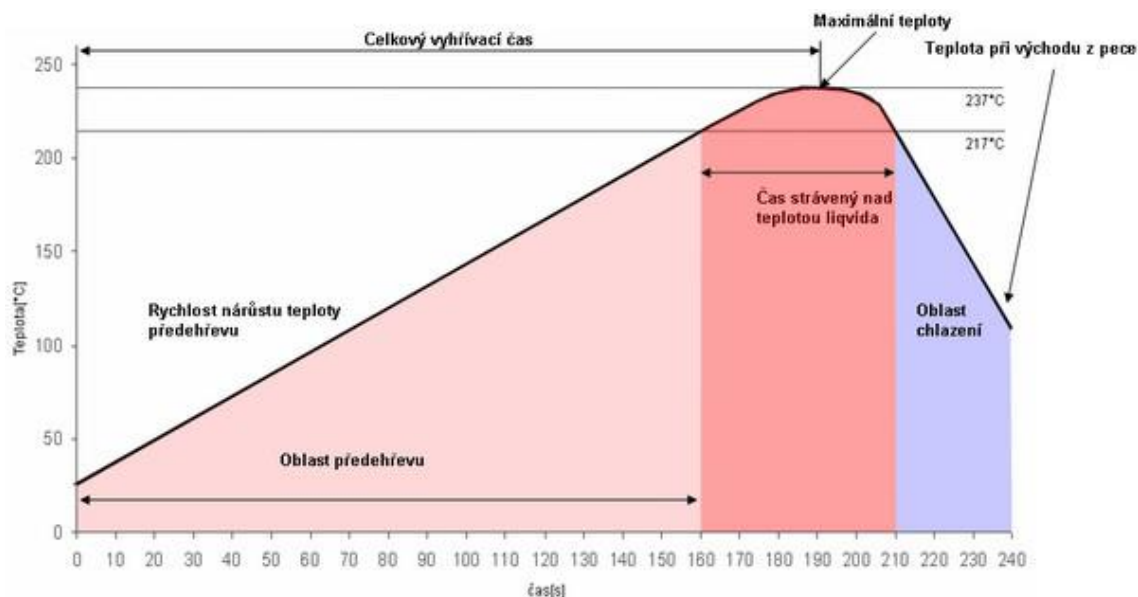


Obr. 1.1: Teplotní profil s vyrovnáním teploty – Ramp Soak Spike [2]

Je snaha udržovat maximální teplotu co nejnižší, aby se omezilo tepelné namáhání součástek a DPS a aby nebyla přesažena teplota skelného přechodu desky. Čas strávený nad teplotou tavení pájky, kdy dochází k tvorbě intermetalických sloučenin, se volí v rozmezí 30 až 90 sekund. V oblasti maximální teploty by se pájený celek neměl nacházet déle než 10 sekund. Poslední částí je zóna chlazení, kde se rychlost poklesu teploty maximálně -3 °C/s, aby se minimalizoval nárůst intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 , která ve větším množství narušuje spoj a zhoršuje jeho mechanické i elektrické vlastnosti [1, 2].

Druhý typický tvar teplotního profilu je na Obr. 1.2. Jak je na první pohled vidět, hlavní rozdíl spočívá v absenci vyrovnávací oblasti a přehřev přechází plynule k maximální teplotě a přetavení. Teplotní gradient přehřevu se volí menší než u profilu typu RSS, aby docházelo k rovnoměrnému prohřátí součástek a eliminaci teplotního

šoku. Obecně se tento tvar profilu používá, pokud je zajištěn homogenní ohřev všech součástí a pájecích ploch, ideálně při pájení součástí se stejnou tepelnou kapacitou.



Obr. 1.2: Teplotní profil s lineárním ohřevem – *Ramp To Spike* [2]

1.3 Pájení v ochranné dusíkové atmosféře

Pro dosažení lepších výsledků při pájení se obecně doporučuje používat při pájecím procesu ochrannou atmosféru. To s sebou ale přináší mnoho problémů v podobě dodatečných nákladů na pájecí zařízení a použitý plyn, a ne vždy je kvalita výsledného pájeného spoje o tolik lepší, aby bylo efektivní se tímto dodatečným opatřením zabývat.

Nejlépe dostupným pájecím médiem je vzduch, který obsahuje téměř 21 objemových procent kyslíku. Ten jako reaktivní plyn reaguje s kovy a při pájecím procesu tvoří na jejich povrchu nepájitelnou oxidovou vrstvu, což zhoršuje smáčivost pájecích a kontaktních ploch na DPS a součástkách [3].

Dusík je nejčastěji používaným plynem pro ochrannou atmosféru při pájení. To je dáno tím, že je to nejlevnější dostupný inertní plyn, a tudíž ani při vysokých teplotách nereaguje s kovy, které jsou součástí pájecího procesu [3].

Tento plyn se začal využívat zejména kvůli směrnici o zákazu používání nebezpečných látek v evropských výrobcích a celkovému ekologickému směřování světa. Mezi látkami zakázanými v běžných elektronických zařízeních, které stanovuje směrnice z roku 2006, nazvaná *Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment*, česky *Omezení užívání některých nebezpečných látek v elektronických a elektrických zařízeních*, se nachází také olovo, které se do té doby hojně používalo jako součást pájecích slitin [4].

Tento zákaz vedl k výzkumu nových pájecích zařízení a technologií, které by eliminovaly nedostatky bezolovnatých pájecích slitin. Jedním z těchto vylepšení bylo právě pájení za přítomnosti dusíku. Hlavní výhodou dusíku je jeho schopnost potlačit zbytkové úrovně kyslíku až na požadované minimum. Pro vyjádření tak nízké koncentrace, jaké je nutné dosáhnout, se využívají jednotky ppm (*parts per million*). Aby bylo možné pozorovat zlepšení kvality pájeného spoje, doporučuje se podle různých zdrojů a aplikací nastavení koncentrace zbytkového kyslíku v rozmezí mezi 1000 ppm až 50 ppm [4].

1.4 Výhody dusíkové atmosféry

Nejdůležitější znatelnou výhodou při pájení v dusíkové atmosféře je již zmíněná absence oxidové vrstvy. To má za následek menší povrchové napětí roztavené pájky a její lepší roztékavost. Zároveň způsobuje větší povrchové napětí pájených povrchů. Společně tyto dva faktory zlepšují smáčivost pájky a zvyšují pevnost výsledného pájeného spoje. Vyšší povrchové napětí pájecích ploch také redukuje výskyt pájkových kuliček na součástkách a mimo pájecí plochy, tzv. *solder balling*. Díky nižší oxidaci se také zlepšují smáčecí charakteristiky při pájení na povrchovou úpravu nikl-zlato nebo přímo na měděné plošky bez povrchové úpravy a celkově je snazší pájet hůře pájitelné povrchy. Tento faktor se uplatní zejména při pájení pouzder BGA a CSP, jelikož ty musí téměř vždy projít vícero pájecími cykly, při kterých jsou pájkové kuličky roztaveny a jejich velký povrch podléhá vyšší oxidaci při pájení bez ochranné atmosféry [5].

Další výhodou vyplývající z nižší míry oxidace je možnost používat méně agresivní tavidla nebo bezoplachová tavidla, tzv. *no-clean*. Dusík potlačuje množství tavidlových zbytků, které by jinak bez následného čištění snižovaly kvalitu a životnost zařízení, jelikož by mohly časem korodovat a způsobit defekt. Méně tavidlových zbytků také usnadňuje následnou kontrolu pájených spojů, jak optickou prováděnou člověkem, tak automatickou pomocí sond. Technik rozhodující o kvalitě zapájené desky si může tavidlové zbytky vyložit jako defekt a poslat desku na rework, zatímco sonda provádějící test elektrického propojení se jimi může zanést a chybně označovat spoje jako vadné. Pájení v dusíkové atmosféře významně zlepšuje kvalitu výsledných spojů, zejména smáčivost pájených povrchů. To vede k poklesu počtu defektů, zejména můstků a nezapájených spojů. Samozřejmě ale nemá vliv na defekty způsobené mechanickým poškozením, např. nadzvednuté pájecí plošky [6].

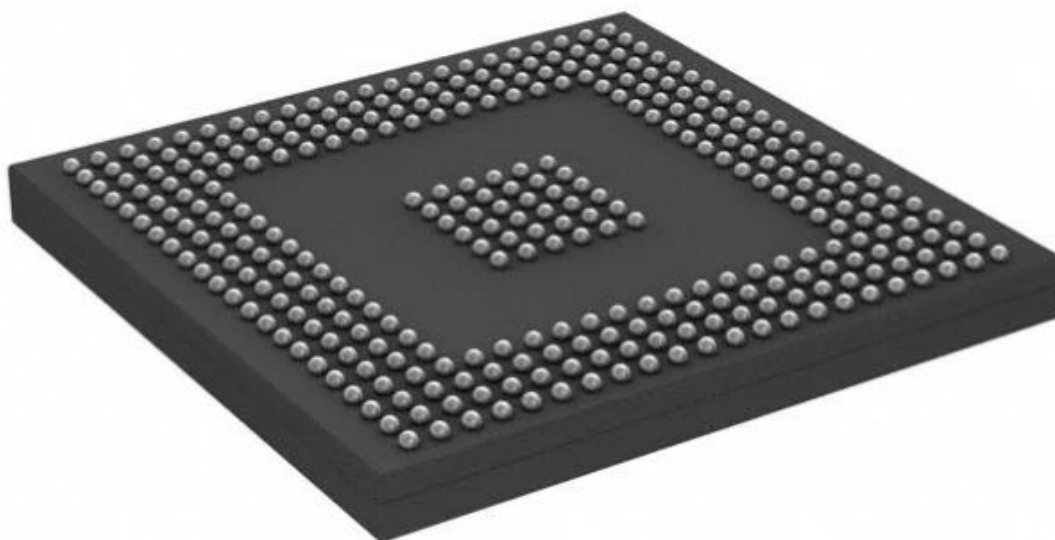
Oxidace kovů probíhá tím rychleji, čím vyšší je jejich teplota. Pokud jsou tedy oxidy eliminovány z procesu, je možné teplotu pájení v tomto ohledu zvýšit a tím zvětšit procesní okno. Výsledný pájený spoj bez nečistot v podobě oxidů vykazuje lepší mechanické a elektrické vlastnosti, díky čemuž je docíleno kvalitnějšího výrobku [7].

2 POUZDRA BGA – BALL GRID ARRAY

V oblasti návrhu a konstrukce elektronických zařízení je v souladu s trendem miniaturizace kladen důraz na co největší hustotu součástek umístěných na desce. Velký skok kupředu nastal při přechodu z vývodových součástek na součástky pro povrchovou montáž, které také ve značné míře přispěly ke zrychlení sériové výroby. Další vývoj směřuje k co nejmenším pouzdrům těchto součástek, zejména integrovaných obvodů.

2.1 Základní charakteristika

BGA pouzdra využívají k umístění kulových vývodů spodní stranu součástky (Obr. 2.1), což je hlavní rozdíl oproti jiným pouzdrům, např. QFP, které má vývody typu L, tzv. *gull-wing*, rozmístěny po všech čtyřech stranách. To znamená, že při použití QFP pouzdra se stejným počtem vývodů je jejich hustota o mnoho větší, což zvyšuje obtížnost pájení, případně je nutné zvětšit rozměry pouzdra nebo zmenšit šířku vývodů. Jelikož je u BGA možné využít celou spodní stranu pro umístění vývodů, mezery mezi pájecími ploškami jsou již znatelně větší při zachování stejné plochy součástky [8].



Obr. 2.1: Příklad pouzdra FBGA (Fine Pitch Ball Grid Array) [9]

Na rozdíl od pouzder LGA (Land Grid Array), která mají na spodní straně pouze vývodové plošky určené k připojení pinů do patice, slouží k propojení BGA pouzder a desek plošných spojů pájkové kuličky o přesně definované velikosti. BGA pouzdra se s těmito kuličkami již dodávají a na DPS jsou připraveny měděné plošky v odpovídajícím rozmístění [8].

2.2 Montáž

Po představení konceptu BGA pouzder panovaly obavy z obtížnosti procesu jejich zapájení na desku plošných spojů. Jelikož se jejich vývody nachází mezi spodní stranou součástky a deskou plošných spojů, pájení vlnou nepřipadá v úvahu. Jako ideální pro sériovou výrobu se ukázalo klasické pájení přetavením, případně pájení v parách pro specifické aplikace [8].

Při přetavení se celá sestava zahřívá a kuličky pájky se začínají roztékat. Pomocí povrchového napětí roztavené pájky se pouzdro vystředí a je drženo na místě, pokud jeho posunutí a pootočení vzhledem k měděným ploškám na DPS nepřesahuje definované hodnoty. Složení pájkových kuliček a teplota pouzdra při pájení se pečlivě vybírá a hlídá, aby došlo k vytvoření kvalitního pájeného bez poškození komponent přítomných v pájecím procesu [10].

2.3 Ověření kvality pájeného spoje

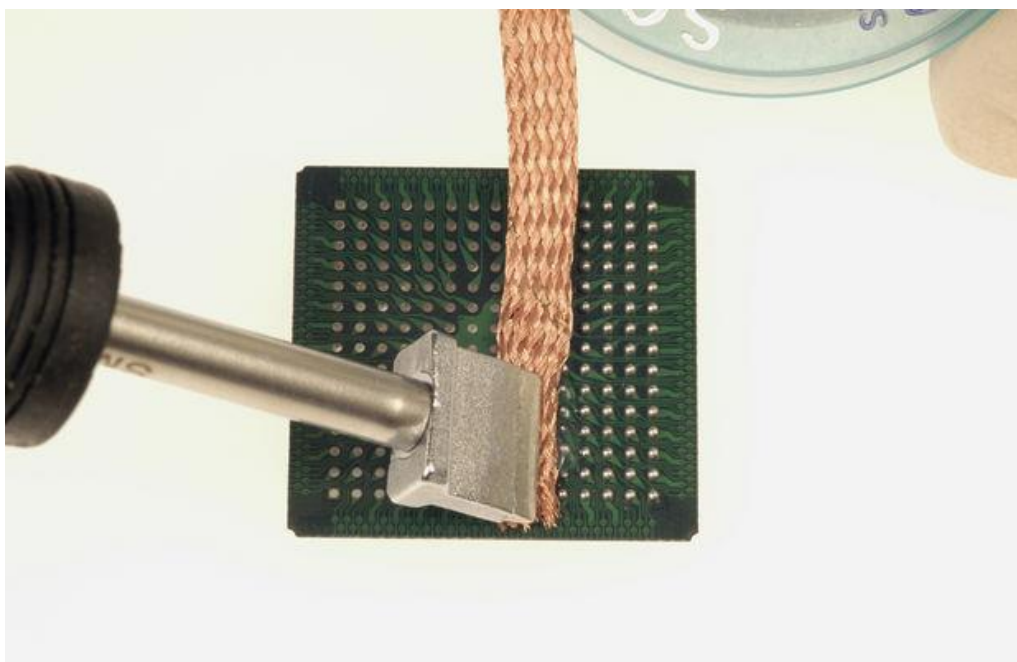
Jedním z problémů při pájení BGA pouzder na desku plošných spojů je kontrola výsledných zapájených spojů. Z důvodů nepřístupnosti kulových vývodů je nutné vyloučit optickou kontrolu. Test elektrického propojení také není průkazný, protože i přes jeho úspěch nemusí kuličky utvořit dostatečně kvalitní pájený spoj a ten se po krátké době rozpadne. Zpočátku se tedy výrobci obávali pájení těchto pouzder a museli vynaložit velké úsilí, aby byli schopni tento proces provádět v požadované kvalitě. Důležité je zvolit takovou teplotu a způsob ohřevu, aby se všechny kuličky dostatečně prohrály a vytvořily pevný a spolehlivý spoj. Jako účinná metoda se ukázala kontrola spojů pomocí rentgenu. Jeho záření dokáže proniknout přes součástku až do kulového spoje a prozkoumat strukturu uvnitř. Tímto způsobem je možné odhalit velké množství defektů, např. dutiny, praskliny, můstky a další. Při kombinaci rentgenu a funkčních testů propojení zapájeného pouzdra je možné uspokojivě zkontrolovat výsledné pájené spoje [10].

2.4 Reballing

Může se stát, že i přes nefunkčnost zařízení je integrovaný obvod s BGA pouzdem zcela v pořádku, např. při poškození kulových vývodů nebo desky plošných spojů na jiném místě. V tom případě je vhodné uvažovat o využití této součástky při dalších aplikacích. Jelikož ale mohou být při odstraňování BGA pouzder poškozeny jejich kulové vývody, případně může být jejich samotný stav důvodem k tomuto procesu, je nutné tyto vývody nejprve znovu vytvořit. Jednoduše řečeno se jedná o odstranění původních pájkových kuliček a následné připájení nových, tzv. *reballing*. Tento proces ale vyžaduje pečlivost

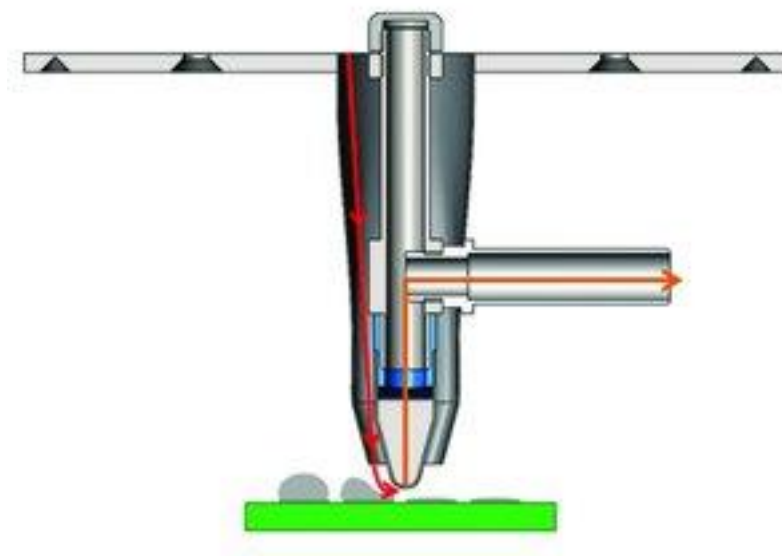
a dodržování předepsaných kroků, jinak může dojít k nevratnému poškození pouzdra. Dalším důvodem k reballingu je také růst intermetalické vrstvy ve spoji vlivem opakovaného vystavení vysokým pájecím teplotám [10].

Po odejmutí pouzdra z desky plošných spojů je nutné z něj nejprve odstranit kulové vývody, tzv. *deballing*. Nejprve se na stranu s vývody nanese vodou rozpustné pastovité tavidlo a opatrně se rozetře. Poté se přes ně přejíždí vhodným pájecím hrotem se správně nastavenou teplotou podle typu slitiny kuliček. Aby vývodové plošky pouzdra byly zcela rovné, použije se pájecí knot, který se umístí pod přejíždějící hrot, případně je možné použít knot již od začátku, jak je ukázáno na Obr. 2.2. V této části procesu je nutné dávat pozor, aby nedošlo k poškrábání nebo nadzvednutí plošek v důsledku použití nadměrné síly nebo špatného hrotu, což by znamenalo v lepším případě významné zkomplikování procesu, v tom horším nevratné poškození BGA pouzdra. Pomocí izopropylalkoholu a antistatické utěrky se poté ze spodní strany pouzdra odstraní tavidlové zbytky [11].



Obr. 2.2: Odstraňování kulových vývodů z BGA pouzdra [11]

Při manuálním odstraňování pájky z vývodů jsou komponenty a základní deska vystavovány riziku poškození, proto je možné využít automatická či poloautomatická zařízení, kde dochází k bezkontaktnímu odsátí roztavené pájky. Při tomto procesu přejíždí hlavice v určité výšce nad komponentou a pomocí horkého plynu taví pájkové kuličky před sebou, které následně odsává pomocí vakua. Na Obr. 2.3 je příklad této hlavice znázorněn v provedení horkovzdušné trysky s vakuovou odsávací hlavicí uvnitř. V jiném provedení může být zahřívání a odsávání samostatně [12].



Obr. 2.3: Hlavice sloužící k bezkontaktnímu tavení a odsávání pájky [12]

Pro další postup je nutné vybrat si jednu z několika možných metod pro umístění a připájení kuliček na vývodové plošky. Nejčastěji se používají šablony z oceli, které jsou přítomny při celém pájecím procesu, tzv. *direct heat*. Šablony jsou vyrobeny na požadovaný typ BGA pouzdra, což znamená, že musí být přesně sesouhlaseny s ohledem na vývody a tvar pouzdra. Na očištěnou spodní stranu BGA pouzdra se nanese tavidlo, přiloží a sesouhlasí se šablona a do ní se nasypou pájkové kuličky. Poté se celá tato sestava ohřeje na teplotu tavení použité pájecí slitiny. *In-direct* šablony se liší v tom, že se po nanesení pájkových kuliček z BGA pouzdra odstraní a nejsou přítomny v pájecím procesu [13].

Další způsob připájení kuliček je pomocí použití jednorázového přípravku. Tato metoda je snadná a rychlá. Spočívá v použití přípravku vyrobeného přímo na požadované pouzdro, stejně jako ocelové šablony, který ale v sobě již z výroby obsahuje pájkové kuličky. Ty jsou tam drženy pomocí speciálního lepidla, které se při pájecím procesu odpaří a tím se z přípravku uvolní kuličky. Po přetavení se poté šablona jednoduše odlepí, nedá se ale použít znova. Výhodou této metody je taktéž eliminace čištění tavidlových zbytků [14].

Pro reballing je také možné použít laser, který se pohybuje nad jednotlivými vývodovými ploškami BGA pouzdra a pomocí infračerveného záření taví jednotlivé pájkové kuličky, které se připájí na plošky pod nimi. Tato metoda také nevyžaduje čištění tavidlových zbytků a eliminuje teplotní namáhání opravované součástky [15].

Reballing BGA pouzder je sám o sobě náročný proces, při kterém je nutné brát v potaz mnoho faktorů, jako hustotu vývodů, tvar pouzdra, dostupný typ ohřevu při pájení, typ pájkových kuliček a další. Velký problém při použití tavidla je nutnost následného čištění tavidlových zbytků mezi kuličkami tak, aby již zapájené vývody nebyly poškozeny. Z tohoto důvodu je vhodné při pájení použít ochrannou atmosféru, jelikož ta eliminuje tavidlové zbytky a má i velké množství dalších pozitivních dopadů na kvalitu spoje a nastavování procesu, viz. kapitola 1.4.

3 PÁJECÍ ZAŘÍZENÍ

Existuje velké množství typů pájecích zařízení, které se v současnosti používají. Při jejich výběru je nutné vzít v potaz mnoho faktorů, např. materiál, na který se bude pájet, typ součástek, výrobní náklady, zda se bude využívat ochranná atmosféra, zda se jedná o velkosériovou výrobu, typ pájecí slitiny a další. Pájecí pece lze dělit na průtažné a vsázkové podle toho, zda se v nich vzorky pohybují na dopravníku, průtažné pece potom dále podle typu pájení na přetavovací a určené pro pájení vlnou.

3.1 Průtažné pece

Tento typ pájecích pecí je vhodný pro pájení zařízení při velkosériové výrobě. Skládají se z určitého množství zón, kterými na dopravníku projíždí vzorek určený k zapájení. V jednotlivých zónách se individuálně nastavuje teplota tak, aby bylo dosaženo ideálního teplotního profilu vzhledem k použitému substrátu, součástkám a pájce. Pomocí většího množství zón je možné tento profil nastavit a řídit velmi přesně. Přetavovací průtažné pece, Obr. 3.1, mají tyto zóny rozmístěny po celé své délce a ty zajišťují i samotné přetavení pájecí pasty. V případě pájení vlnou slouží tyto zóny hlavně k předehřevu a následnému chlazení, ale k zapájení součástek slouží jeden, případně více přechodů vzorku přes vlnu roztavené pájky. Při rozhodování mezi pájením vlnou a přetavením se musí brát v potaz hlavně typ pájených součástek, např. součástky s vývody na spodní straně nelze pájet vlnou, stejně tak pokud jsou příliš vysoké. Pájení vlnou také desku více tepelně namáhá [16].



Obr. 3.1: Průtažná přetavovací pec, výrobce HB – Automation [17]

3.2 Vsázkové přetavovací pece

Hlavní výhodou vsázkových pecí jsou jejich rozměry, jelikož jsou několikanásobně menší než průtažné pece. Na druhou stranu je pájení ve vsázkových pecích mnohonásobně pomalejší a nastavování teplotního profilu a pájecích parametrů je náročnější. Rozhodující je tedy množství výrobků, které je potřeba zapájet, a čas k tomu dostupný. Z toho vyplývá, že vsázkové pece jsou vhodné spíše pro speciální aplikace, jako jsou prototypy než pro velkosériovou výrobu. Další uplatnění je i pájení v parách, což v průtažných pecích provést nelze. Na Obr. 3.2 je jako příklad zobrazena vsázková přetavovací pec [16].



Obr. 3.2: Vsázková přetavovací pec MIPEC 4SOLDER [18]

3.3 Pájecí pece pro reballing BGA pouzder

Tyto pece jsou velmi podobné klasickým vsázkovým pecím, pouze jsou jejich parametry uzpůsobeny pro malé rozměry přetavovaných pouzder a specifické požadavky procesu reballing. Na zařízení pro proces rework se specializuje firma MARTIN GmbH, kde bylo vyrobeno několik typů těchto zařízení určených pro specifické potřeby. Speciálně pro reballing byla představena pájecí pec MARTIN Reball-03 v roce 2007, jejíž vylepšování vedlo k výrobě pecí MINIOVEN 04 (Obr. 3.3) a MINIOVEN 05. Tato zařízení jsou navržena s důrazem na malé rozměry, zjednodušení procesu a dobrou výslednou kvalitu pájených spojů. Typy MINIOVEN mají infračervené zářiče a vnitřní cirkulaci vzduchu zajišťující rovnoměrné ohřátí vzorku, místo na uchycení pouzdra i se šablonou a vstup na inertní plyny v případě potřeby použití ochranné atmosféry [19].



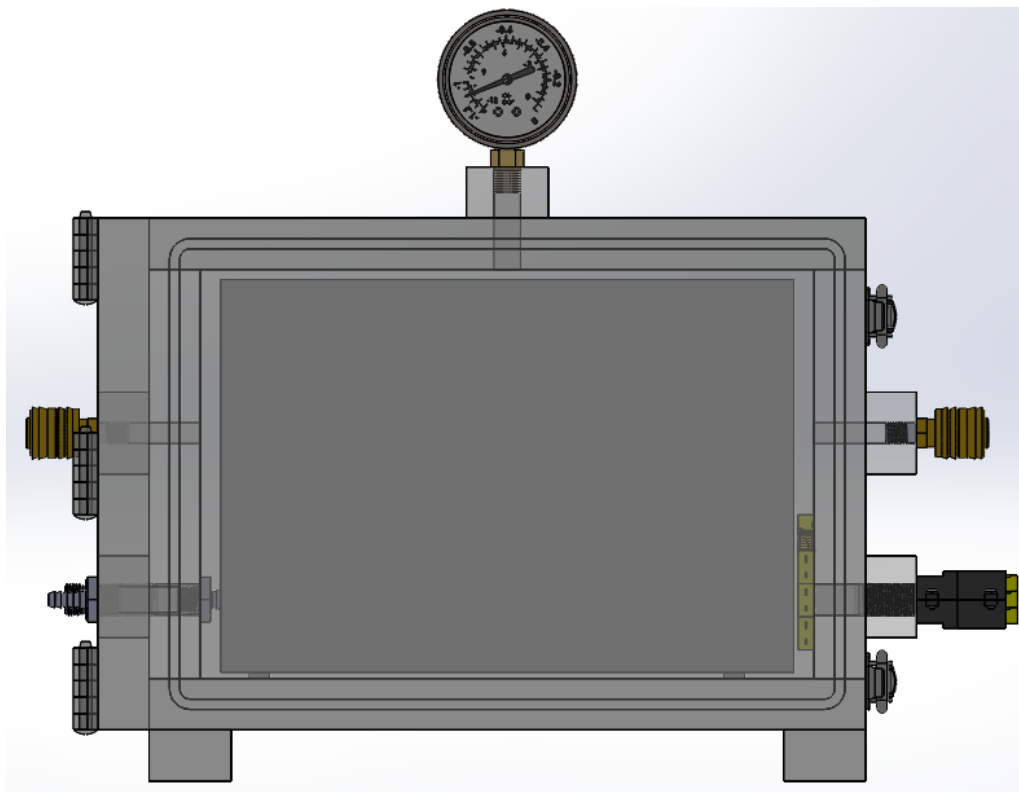
Obr. 3.3: Pájecí pec MARTIN's MINIOVEN 04 [19]

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Obsahem této části je samotný návrh pájecího zařízení pro reballing BGA pouzder včetně teplotních simulací proudění v prostředí programu SolidWorks. Jsou zde řešeny otázky umístění jednotlivých prvků, vhodných součástek, jejich výroby, použitých materiálů a další. CAD modely manometru, termočlánku a ventilátoru byly převzaty z volných knihoven komunity GrabCAD.

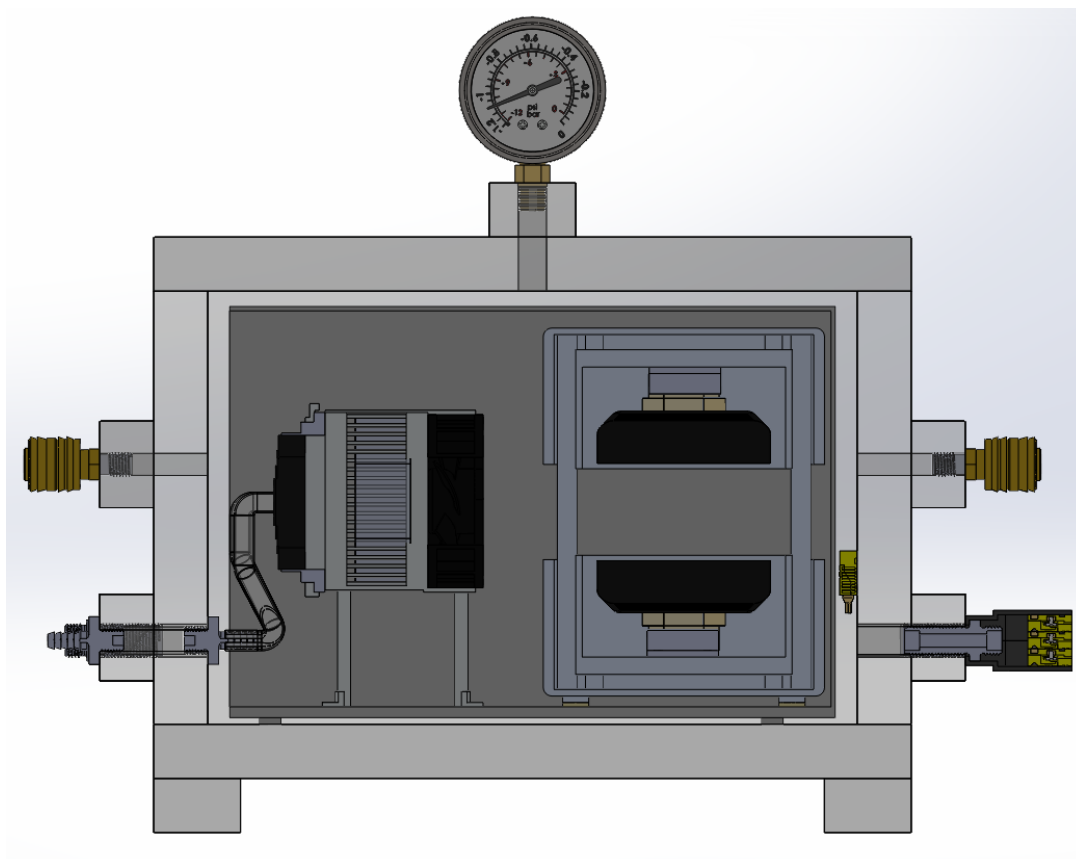
4.1 Návrh pájecího zařízení

Návrh zařízení spočíval ve výběru, vymodelování a umístění jednotlivých komponent do 3D modelu již vyrobené plexisklové bedny. Výběr součástek a jejich materiálu byl proveden s ohledem na dostupnost, proveditelnost a cenu. Výsledkem je předběžný model celého zařízení bez okolních periférií, jako je např. výkonová a externí chladicí část. Je možné, že při konstrukci se finální návrh může lehce pozměnit v důsledku použití lepšího či snazšího řešení, nebo naopak nemožnosti implementovat již navržené prvky. Funkce zařízení by ale měla návrhu odpovídat. Na Obr. 4.1 je uveden čelní pohled na pájecí pec, stínění z hliníku zabraňuje pohledu na vnitřní komponenty zařízení.



Obr. 4.1: CAD model – Pohled zepředu na pájecí pec

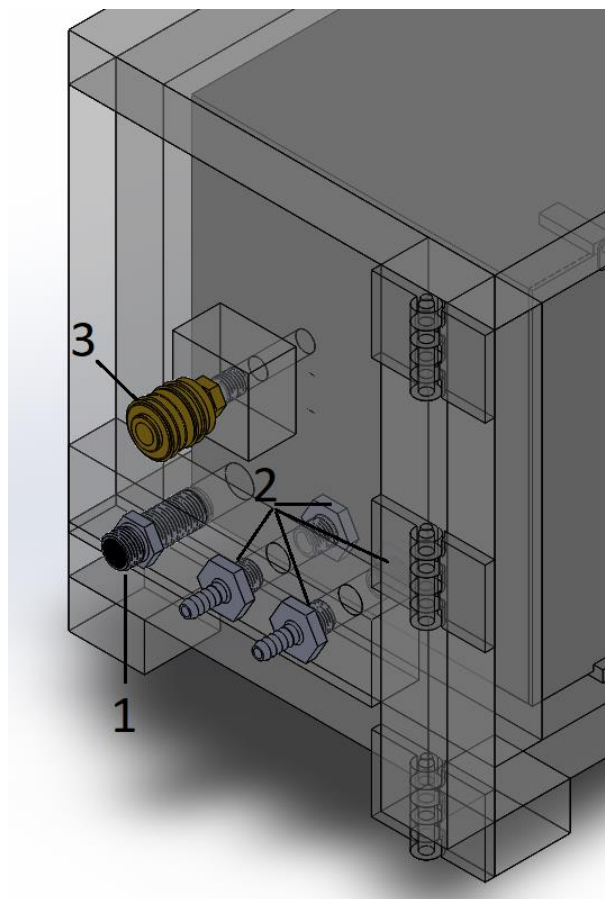
Na Obr. 4.2 je vyobrazen průřez pájecím zařízením v přední rovině. V tomto pohledu je již možné pozorovat všechny části modelu. Na horní straně je umístěn manometr sloužící k měření tlaku při odčerpávání vzduchu a následném čerpání dusíku. Po stranách jsou do plexiskla zašroubované průchodky, spojky a fitinky sloužící k propojení okolí s pracovním prostorem.



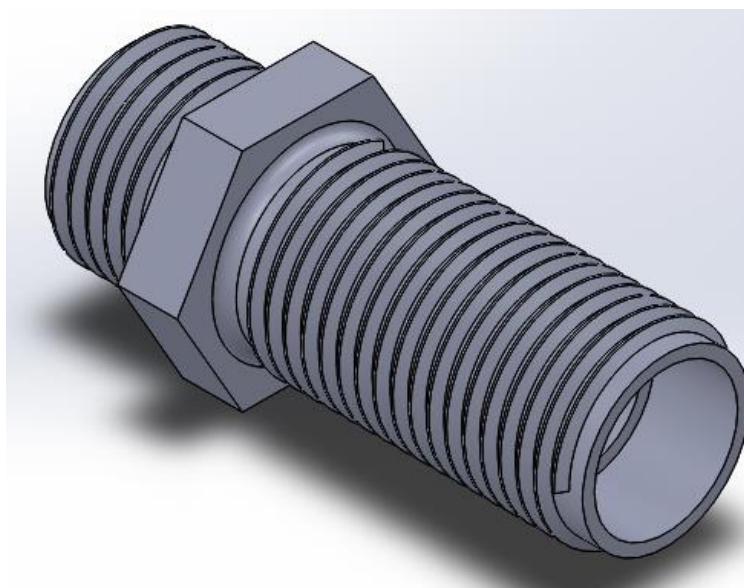
Obr. 4.2: CAD model – Pohled zepředu na průřez pájecí pecí

4.1.1 Vnější a propojovací část

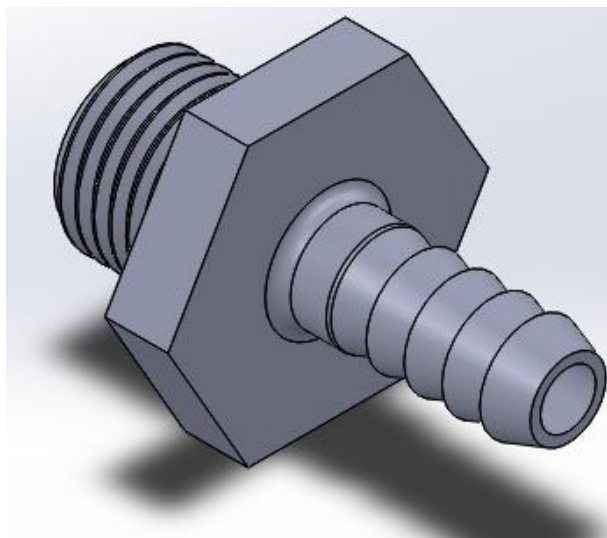
Jelikož je potřeba propojit okolí a pracovní prostor kvůli napájení, chlazení a měření teploty a koncentrace kyslíku, byly vybrány různé typy součástek a umístěny do zesílených částí plexisklových stěn. Jak je vidět na Obr. 4.3, v levé stěně zařízení bude umístěno šest součástek. Na dlouhém zesílení se nachází průchodka z pozinkované oceli (Obr. 4.4), kterou budou procházet vodiče k napájení. Průchodky a jejich výrobu popisuje kapitola 4.3. Dále se na dlouhém zesílení nachází dvě nerezové fitinky s vnějším průměrem 8 mm na připojení hadiček (Obr. 4.5). Na vnitřní straně jim odpovídají další dvě tyto fitinky a dohromady tvoří dva průchody pro chladicí kapalinu.



Obr. 4.3: CAD model – Pootočený náhled na levou stranu zařízení; 1. průchodka na vodiče, 2. fitinky, 3. přípojka na vakuum a dusík

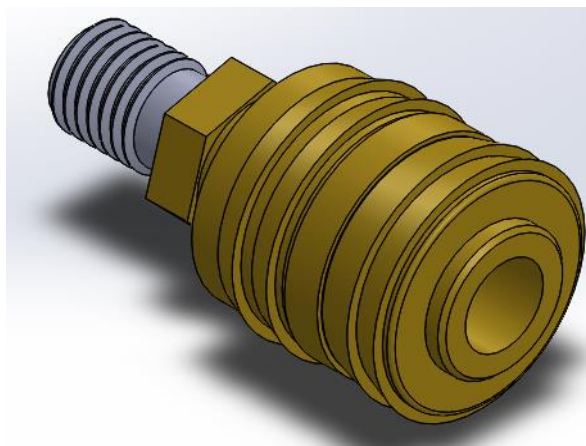


Obr. 4.4: CAD model – Průchodka z pozinkované oceli



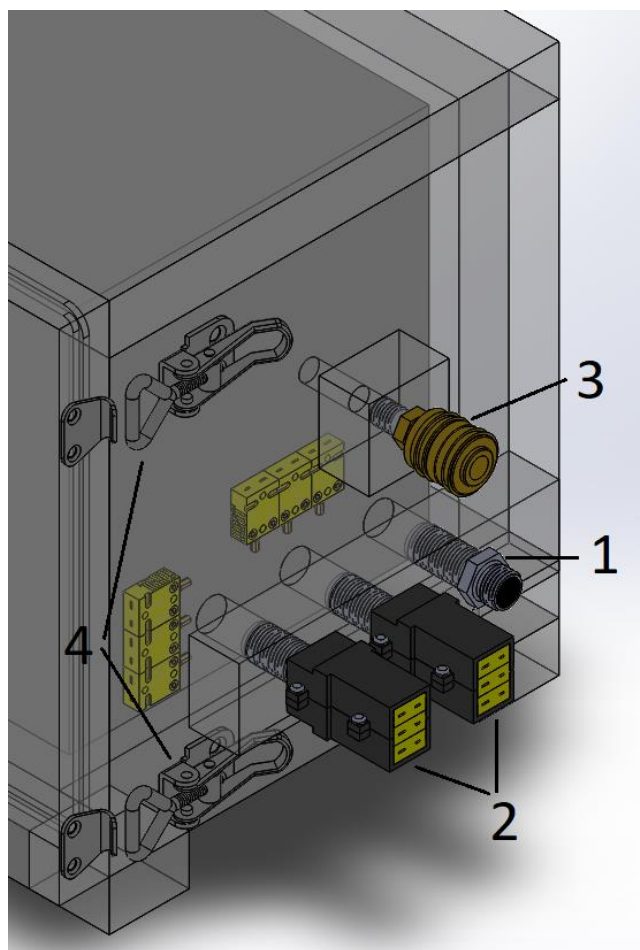
Obr. 4.5: CAD model – Nerezová fitinka

Poslední součástkou umístěnou na levé straně zařízení je mosazná přípojka (Obr. 4.6), která slouží k připojení hadice k odčerpání vzduchu na úroveň hrubého vakua, konkrétně hodnoty 2×10^4 Pa. Po odčerpání vzduchu se poté přes stejný typ spojky umístěné na druhé straně zařízení načerpá dusík až do hodnot normálního tlaku. Tento proces se může několikrát opakovat až do dosažení požadované hodnoty zbytkového kyslíku. Ke zjišťování koncentrace kyslíku bude použito zařízení Zr-Ox MKII Ridzewski GmbH, jehož měřicí rozsah je 1 ppm až 99,9 % kyslíku v inertních plynech. Jeho nevýhodou je fakt, že pro měření potřebuje odebírat malé množství zkoumaného plynu pod normálním nebo mírně zvýšeným tlakem, což může po delší době vést k podtlaku a ukončení měření. Tomuto problému se dá předejít pomocí vytvoření mírného přetlaku v pájecím zařízení při vpouštění dusíku, případně bude nutné se spokojit s ukončením měření koncentrace zbytkového kyslíku ještě před koncem pájecího procesu.

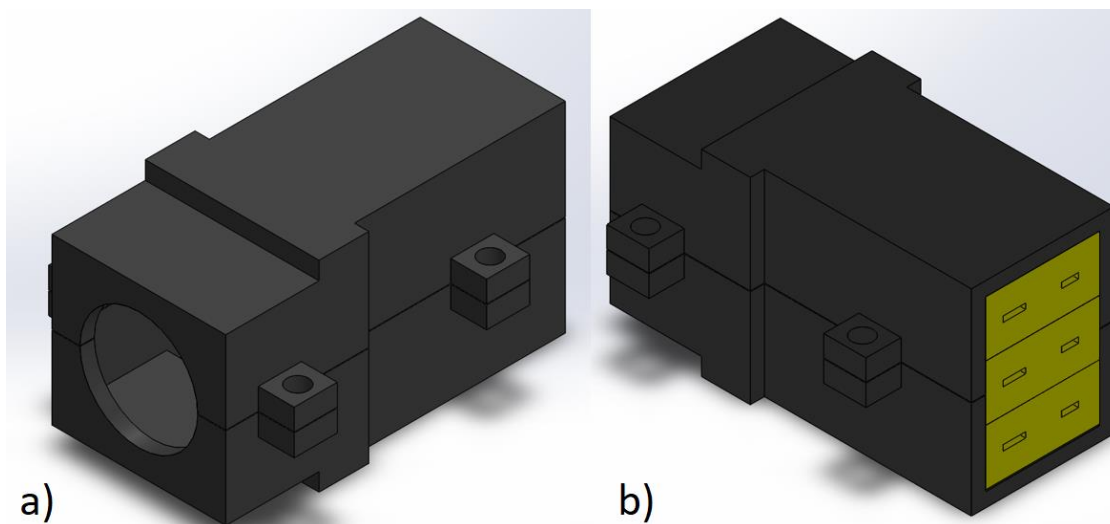


Obr. 4.6: CAD model – Mosazná přípojka

Pravá strana zařízení (Obr. 4.7) neobsahuje žádné fitinky, ale pouze stejnou mosaznou přípojku na vakuum nebo dusík (Obr. 4.6) a na dlouhém zesílení jsou umístěny tři pozinkované průchodky (Obr. 4.4). Průchodka číslo 1 je určená na vodiče pro napájení infračervených zářičů. K měření teploty byly využity vhodně umístěné termočlánky typu K. Dvěma zbývajících průchodkami prochází dohromady pět párů termočlánekových drátů. Tyto termočlánekové dráty se umístily do zásuvkových konektorů a na vnější straně všechny konektory dohromady do pouzdra, jehož strana s kruhovým otvorem byla umístěna mezi průchodku a matku (Obr. 4.8 a)). Zásuvkové konektory byly zvoleny z důvodu větší mechanické odolnosti, jelikož u nich není nebezpečí poškození vývodů při manipulaci se zařízením na vnější straně pouzdra, se kterým budou v jedné rovině (Obr. 4.8 b)). Pouzdra na konektory byla vytištěna na 3D tiskárně a sestávají ze dvou symetrických částí, které se po umístění na průchodku spojily pomocí šroubů. Na vnitřní straně zařízení byly konektory přilepeny přímo na plexisklovou stěnu v rámci úspory místa.



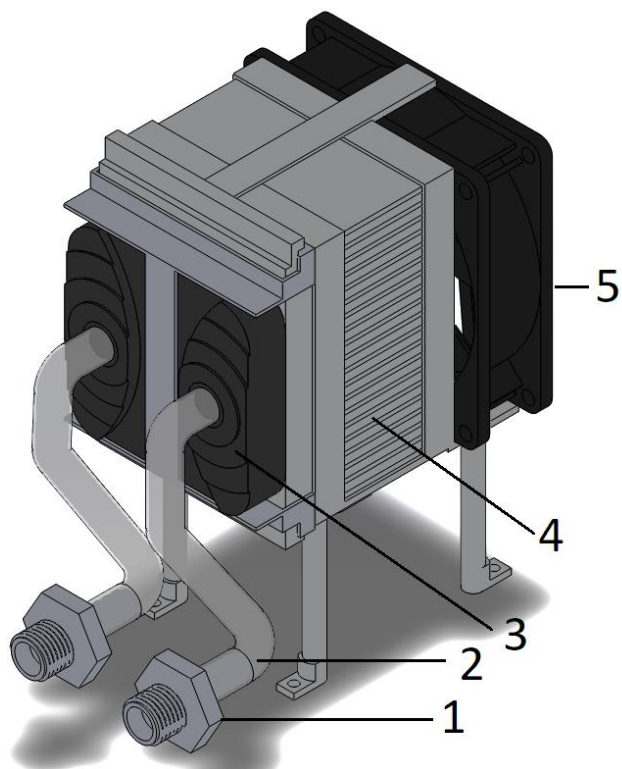
Obr. 4.7: CAD model – Pootočený náhled na pravou stranu zařízení; 1. průchodka na vodiče, 2. průchodky na termočlánekové dráty, 3. mosazná přípojka, 4. páčky na uzavírání zařízení



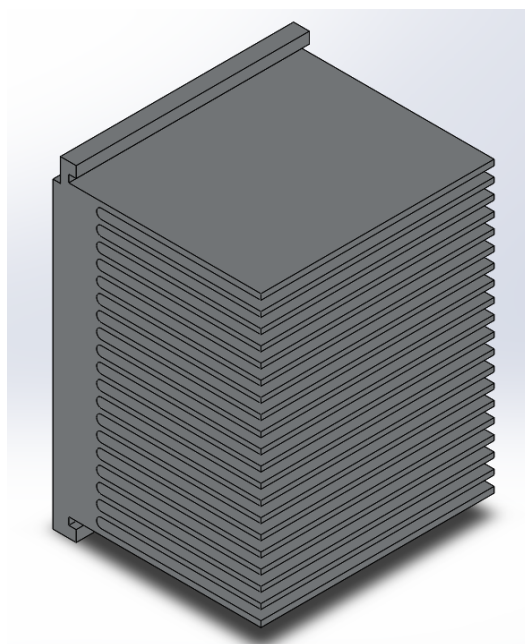
Obr. 4.8: CAD model – Pouzdro na termočlánky; a) kruhový otvor k upevnění na průchodku
b) obdélníkový otvor na tři termočláňkové konektory

4.1.2 Chladicí část

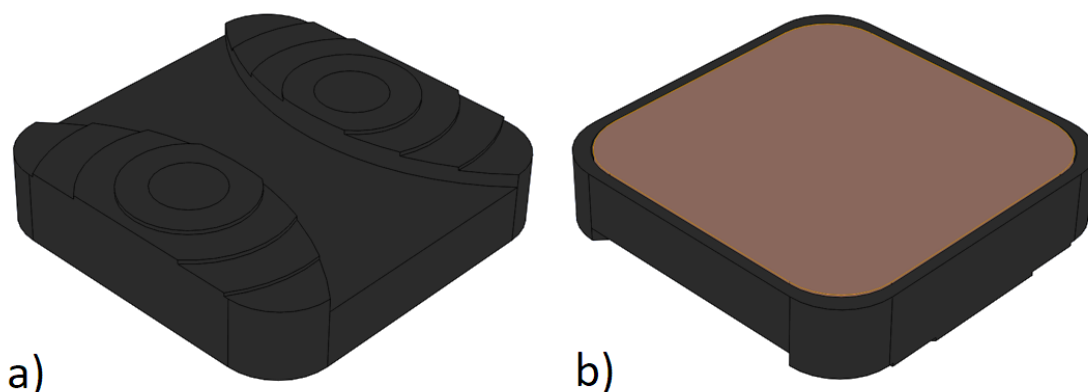
Celá vnitřní sestava zajišťující chlazení je zobrazena na Obr. 4.9. Chladicí část sestává mimo jiné z vodního chlazení Magicool DIY Liquid Cooling System, které ale místo čipu, k čemuž je primárně určeno, chladí žebrovaný hliníkový blok, tzv. *heat sink* (Obr. 4.10), který byl navržen tak, aby měl co největší styčnou plochu s okolní atmosférou. Ochlazená kapalina byla přivedena do zařízení skrze hadičky a fitinky a poté do plastového chladiče (Obr. 4.11 a)), kde skrz měděnou kontaktní plochu dochází ke chlazení hliníkového bloku (Obr. 4.11 b)). *Heat sink* zde funguje poněkud jinak, než je běžné. Jeho základna totiž zajišťuje chlazení, a to udržuje nízkou teplotu jeho žebrování. Při klasickém použití, např. při chlazení čipu, je jeho základna umístěna přímo na zdroji tepla, tedy na čipu, a teplo se rozšiřuje do žebrování, kde kvůli velké styčné ploše dochází k chlazení vzduchem. V návrhu tohoto zařízení byl umístěn ventilátor na konci žebrování a při zapnutí fouká směrem od chladicí sestavy. K přívodu napájecích vodičů ventilátoru byla použita průchodka číslo 1 na Obr. 4.3, tedy na levé straně zařízení.



Obr. 4.9: CAD model – Chladicí sestava; 1. fitinka, 2. hadička, 3. chladicí blok sestavy Magicool, 4. chladič, 5. ventilátor



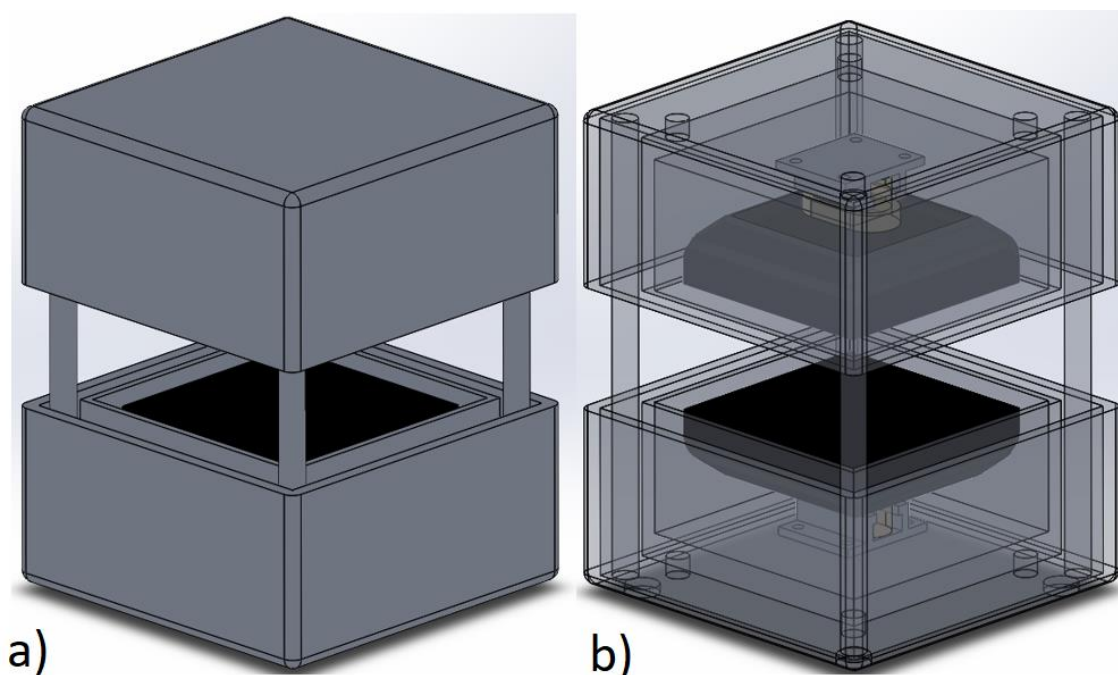
Obr. 4.10: CAD model – Hliníkový chladič (tzv. *heat sink*)



Obr. 4.11: CAD model – Chladicí blok sestavy Magicool; a) horní strana s otvory na hadičky
b) měděná ploška na spodní straně

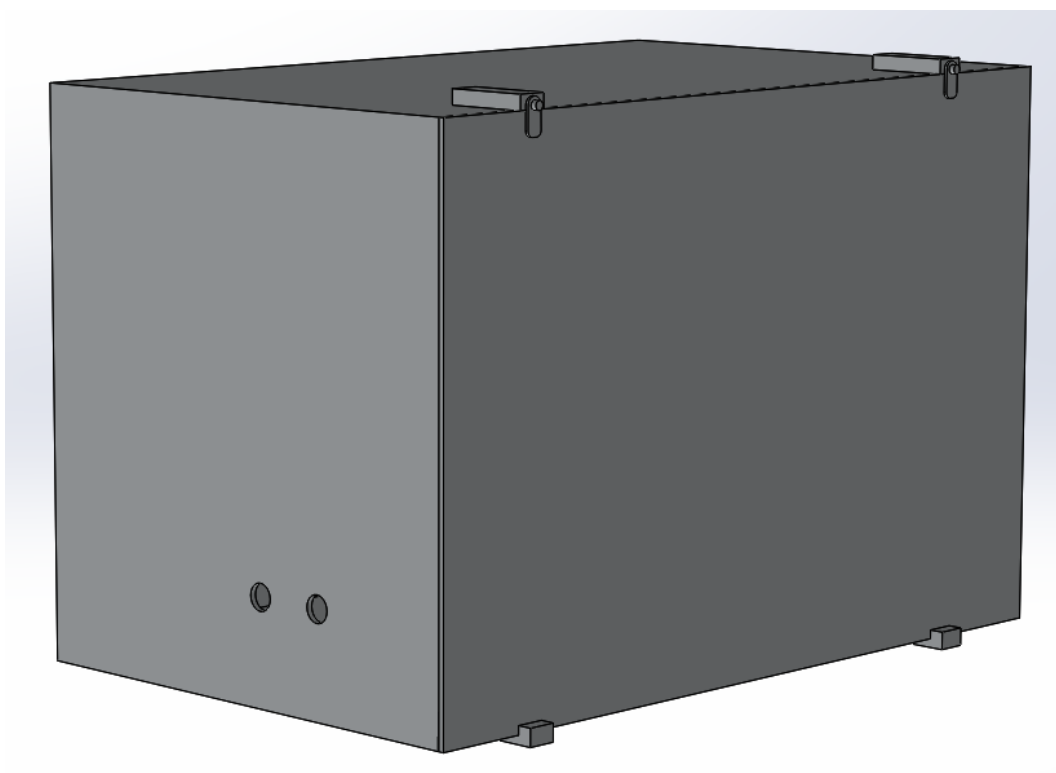
4.1.3 Ohřevná a stínící část

Zahřívání pájeného vzorku zajišťuje dvojice infračervených zářičů umístěných v konstrukci proti sobě. Návrh tohoto celku je uveden na Obr. 4.12 a). K pohledu na vnitřní strukturu slouží zprůhlednění stěn, což je znázorněno na Obr. 4.12 b). Konstrukce byla navržena z více vrstev nerezového plechu tak, aby bezpečně odolala vysokým teplotám, v co největší míře bránila průniku tepla do okolí a aby poskytla kvalitní uchycení infračervených zářičů. Zářiče bylo nutné uchytit tak, aby se minimalizoval přenos tepla na konstrukci. Vyrobená konstrukce (Obr. 4.18) se liší od návrhu z důvodu úspory místa uvnitř zařízení, viz kapitola 4.3.2.



Obr. 4.12: CAD model – Ohřevná část; a) pohled zvenku b) viditelná vnitřní struktura

Jelikož není možné navrhnout konstrukci tak, aby dokonale bránila průniku tepla ze zářičů a zároveň byla dobře přístupná pro manipulaci s pájeným vzorkem, bylo nutné odizolovat okolní plexisklové stěny pomocí hliníkového stínění (Obr. 4.13). S ohledem na dobrou přístupnost pracovního prostoru bylo navrženo řešení se samostatnou přední stěnou, která je uchycena pomocí dolních zarážek a horních otočných úchytek. Při umísťování vzorku nebo jiné manipulaci ji lze tedy snadno celou odstranit. Na straně chladičí sestavy bylo také potřeba umístit stínění z důvodu proudění tepla způsobeného ventilátorem.



Obr. 4.13. CAD model – Hliníkové stínění s odnímatelnou přední stěnou

4.2 Teplotní simulace přenosu tepla

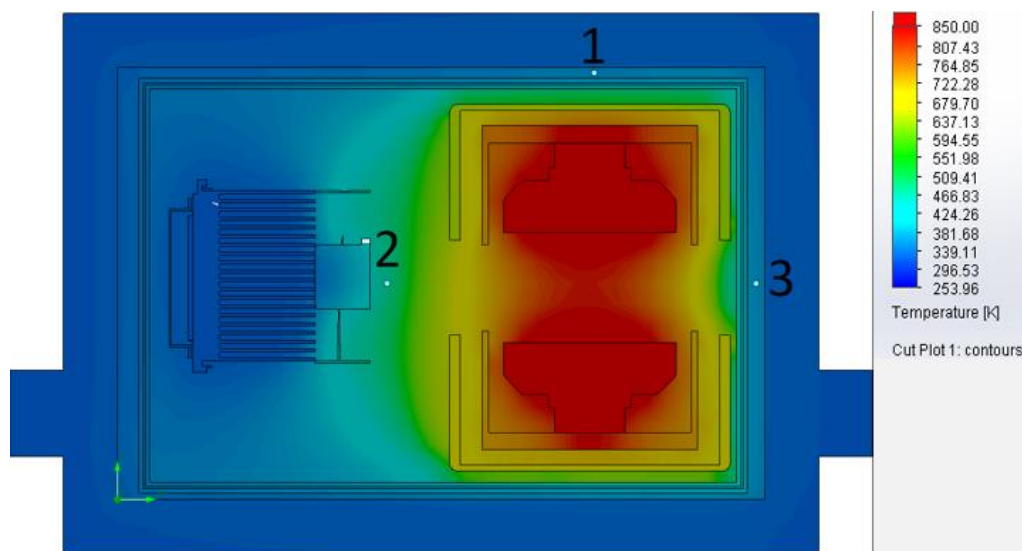
Pro teplotní simulace přenosu tepla byl použit integrovaný nástroj SolidWorks Flow Simulation a jejich výsledky byly považovány za orientační. Po zkonstruování pájecího zařízení a jeho spuštění bylo nutné velmi pečlivě hlídat vzrůstající teplotu v blízkosti plexisklových stěn nehledě na výsledky simulací. Ty názorně ukazují důležitost hliníkového stínění a nebezpečí vyplývající z několikanásobného překročení doby pájecího procesu. Pro tyto účely byly nastaveny parametry náhradního modelu pro napodobení několika pájecích procesů za sebou. Čas teplotních simulací byl nastaven na 5 minut s maximální teplotou ohřevných těles, což pokrývá celý pájecí proces časově

i teplotně, jelikož při pájení bude teplota těles růst postupně. Časový krok výpočtu byl nastaven na 0,1 sekundy a ukládání výsledků každou sekundu. Jako vnitřní atmosféra byl nastaven dusík. V Tab. 4.1 jsou uvedeny materiály a jejich parametry použité při simulacích. Emisivita zářičů byla nastavena na $\varepsilon = 0,96$ a hliníkových částí na $\varepsilon = 0,2$.

Tab. 4.1: Parametry materiálů použitých při simulacích

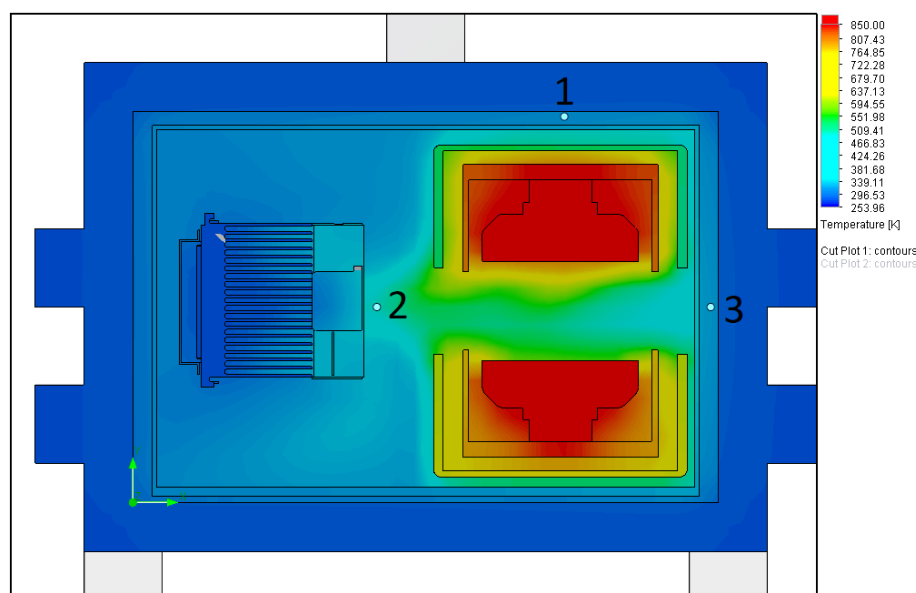
Součást	Materiál	Hustota [kg/m ³]	Součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]	Měrná tepelná kapacita [J/(kg·K)]
Stěny zařízení	plexisklo	1190	0,21	1250
Stínění	hliník – 1060 slitina	2700	200	900
Konstrukce na zářiče	nerezová ocel	8027	14,6	450
<i>Heat sink</i>	hliník – slitina 6061	2700	170	1300
IR zářiče	korundová keramika	3890	35	880
Ventilátor	ocel	7800	43	440
<i>Hotplate</i>	dural	2800	134	880

Na Obr. 4.14 je uvedena simulace, kde se na začátku nastavila teplota zářičů na $T = 873$ K, což byla odzkoušená maximální teplota, které zářiče při pájecím procesu dosáhnou. Tyto zkoušky byly provedeny v otevřeném prostoru, kde dochází k velkému chlazení okolním prostředím, tudíž je možné, že při umístění v pájecí peci bude maximální potřebná teplota nižší. Součástí této simulace nebylo spuštění ventilátoru, proto je teplota $T_3 = 383$ K (110 °C). Avšak bezpečná teplota plexiskla je pouhých 353 K (80 °C). Dochází tedy k překročení teploty o 30 °C, kdy už se plexisklo může tavit. Na levé straně za chladičem je udržována nízká teplota, protože nedochází k vnitřnímu proudění tepla. Teplota hliníkového chladiče byla nastavena na 293 K neboli 20 °C.

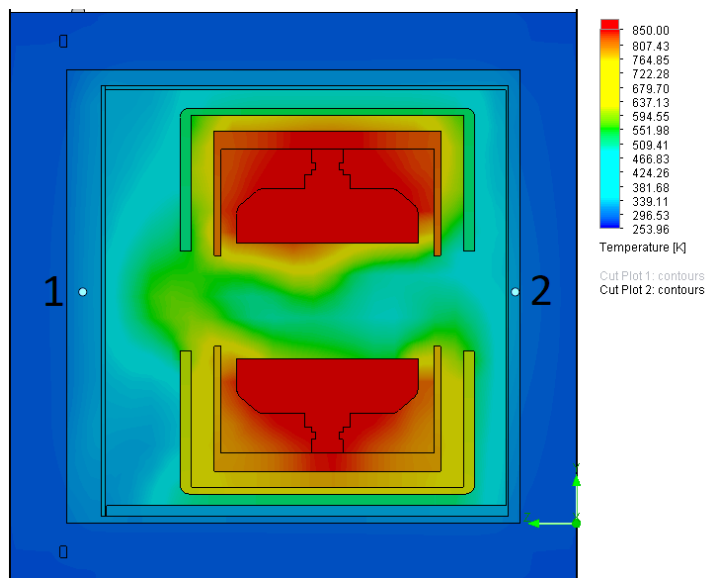


Obr. 4.14: Teplotní simulace bez ventilátoru; $T_1 = 323 \text{ K}$, $T_2 = 436 \text{ K}$, $T_3 = 383 \text{ K}$

Na Obr. 4.15 je uvedena simulace se stejnými parametry jako na Obr. 4.14, navíc ale počítá se zapnutým ventilátorem s nastavenou rychlostí otáčení 210 rad/s neboli 2000 otáček za minutu. Bylo vytvořeno proudění a v celém objemu se rovnoměrněji vyrovnává teplota. Z tohoto důvodu už musí být hliníkové stínění zcela uzavřené, aby nedošlo k vystavení plexiskla příliš vysokým teplotám. Na Obr. 4.16 je uveden boční pohled na tuto simulaci, ze kterého vyplynula potřeba věnovat zvýšenou pozornost vzdálenosti mezi konstrukcí se zářiči, stíněním a plexisklovou stěnou.

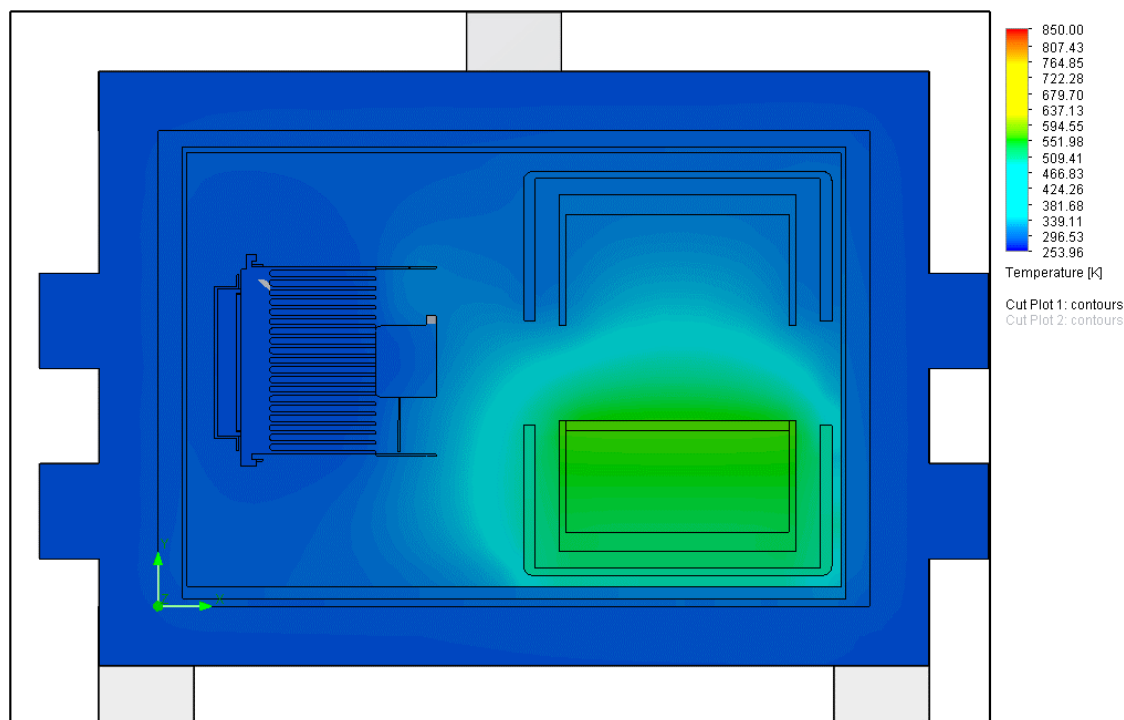


Obr. 4.15: Teplotní simulace se spuštěným ventilátorem, čelní pohled; $T_1 = 335 \text{ K}$, $T_2 = 460 \text{ K}$, $T_3 = 350 \text{ K}$



Obr. 4.16: Teplotní simulace se spuštěným ventilátorem, boční pohled; $T_1 = 338 \text{ K}$, $T_2 = 352 \text{ K}$

Vzhledem k těmto simulacím a praktickým poznatkům z pájení s infračerveným ohřevem se předpokládalo, že po vytvoření dostatečně silného stínění bude toto pájecí zařízení fungovat tak, jak bylo navrženo. Jako další varianta, v případě nemožnosti použití dvou infračervených zářičů, byl zvolen ohřev pomocí horké desky, tzv. *hotplate*. Jelikož se jedná o kontaktní způsob ohřevu, maximální teplota tohoto tělesa může dosahovat maximálně $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Výhodou by bylo také značné zmenšení objemu oproti zářičům. Tím by bylo zcela eliminováno riziko přehřívání plexisklových stěn i bez spuštěného ventilátoru, jak je názorně vidět na Obr. 4.17. Nevýhodou je však nemožnost procesů s oboustrannou montáží a také větší tepelná zátěž pájeného pouzdra nebo desky plošných spojů.



Obr. 4.17: Teplotní simulace s ohřevnou deskou bez spuštěného ventilátoru

4.3 Konstrukční část

Před započítím výroby jednotlivých prvků byly vybrány vhodné součástky, materiál a určen předpokládaný postup.

4.3.1 PMMA box

Tento plexisklový box byl vyroben na zakázku podle daných specifikací a slouží pro oddělení pracovního prostoru od okolí. Jeho stěny mají standardně tloušťku 25 mm, ale v místech s propojovacími prvky jsou zesíleny o dalších 25 mm na celkových 50 mm. Jeho součástí jsou také dvířka a po jejich uzavření dochází k odizolování vnějšího prostředí. Po vybrání potřebných průchozích součástí byly do zesílených částí vyvrtány otvory s odpovídajícími závity.

Plexisklo je materiál, který při určitých hodnotách vakua více či méně plynní. V samotné struktuře je přítomný vzduch, který se v případě čerpání vakua uvolňuje a vstupuje do čerpané oblasti, čímž snižuje vakuum. V případě rozdílných hodnot tlaku propouští stěny plexiskla zejména vzduch a vodu. PMMA je materiál hydrofilní, tudíž se voda po kontaktu s povrchem může absorbovat, případně ulpívat na jeho povrchu. Plexisklo může teoreticky absorbovat množství vody odpovídající 0,4 % své hmotnosti. Při váze boxu téměř 13 kg tomu odpovídá 50 g vody. Při pokojové teplotě $T = 25\text{ °C}$ by se voda začala odpařovat a snižovat vakuum při hodnotě tlaku $P = 3,169\text{ kPa}$. V navrženém

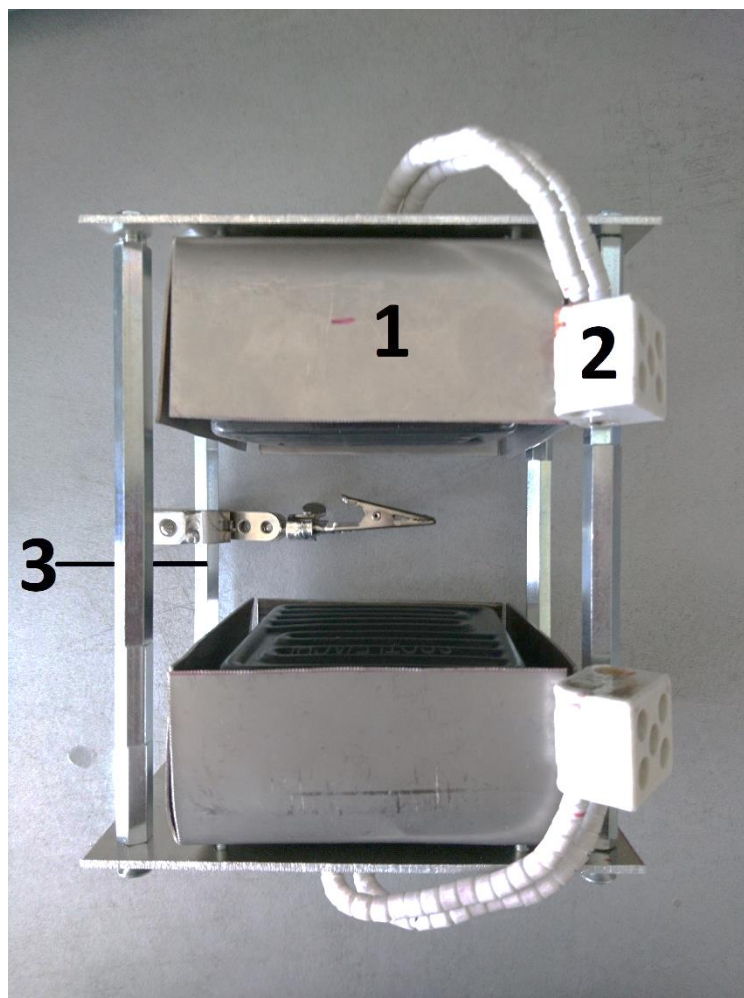
zařízení se ale počítá pouze s hodnotou $P = 20 \text{ kPa}$, při které by odpařování začalo až při teplotě $T = 60 \text{ °C}$. Této teploty by plexisklo v zařízení vůbec nemělo dosáhnout, ale pokud by k tomu z nějakých důvodů došlo, stačilo by pouze počkat, až se všechna kapalina vypaří a pokles vakua se zastaví. Využití plexiskla při vakuových aplikacích se uvádí až do hodnoty tlaku přibližně $P = 20 \text{ Pa}$, což poskytuje dostatečnou rezervu pro použití v tomto zařízení [20, 21].

4.3.2 Ohřevná část

Při výrobě této části bylo dbáno zejména na minimální přenos tepla vedením z infračervených zářičů na konstrukci, zářením na okolní stěny a na kompaktní rozměry vzhledem k omezenému prostoru uvnitř zařízení. Zářiče jsou uchyceny ve stejných krytech z nerezového plechu. Tyto kryty jsou přišroubovány k hliníkovým destičkám a až ty jsou navzájem spojeny čtyřmi distančními sloupky.

Nerezový plech byl vybrán z důvodu vysoké teplotní odolnosti, aby nedocházelo k jeho degradaci v přítomnosti infračervených zářičů. Na přední straně ohřevné konstrukce se ve finální podobě v zařízení nachází pouze jeden distanční sloupek. Ten sestává ze dvou menších, které jsou přišroubovány napevno na koncích a mezi nimi se nachází jeden větší, který je otočný a slouží k uchycení pájeného vzorku a jeho umístění do požadované polohy. Na Obr. 4.18 je ukázána konstrukce ještě se všemi sloupky, které je možné podle potřeby měnit a upravovat.

Napájecí vodiče zářičů jsou odizolovány keramickými korálky a vyvedeny na vnější stranu krytu, kde jsou uchyceny do propojovacích svorek.



Obr. 4.18: Konstrukce s topnými tělesy; 1. nerezový kryt, 2. propojovací svorka, 3. otočný distanční sloupek na uchycení vzorku

4.3.3 Stínění

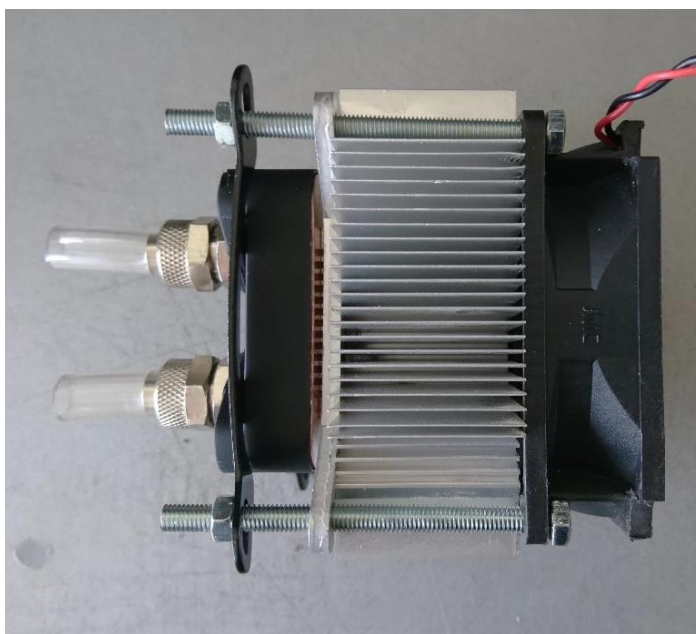
Stínění sestává ze dvou vrstev hliníkového plechu tloušťky 2 mm se vzduchovou mezerou mezi nimi přibližně 1 mm. Při výrobě byly narysovány jednotlivé části spojené tak, aby je po jejich následném vyřezání bylo možné ohnout na ohýbačce plechu. Z důvodu nedokonalého ohnutí bylo nutné rozměry některých stran ještě dodatečně upravit. Dvířka stínění jsou vyrobená ze dvou vrstev stejného plechu sešroubovaných k sobě se vzduchovou mezerou uprostřed a madlem pro lepší manipulaci. Hliník byl vybrán jak z důvodu snadné obrobitelnosti svépomocí, tak také kvůli jeho tepelným vlastnostem. K jeho ohřívání dochází zejména nad topnými tělesy a díky velké tepelné vodivosti hliníku se absorbované teplo snáz rozptýlí do jeho objemu.

Na pravé straně je vyřezán obdélníkový otvor, ve kterém jsou umístěny propojovací svorky pro napájecí vodiče vycházející z průchodek. O něco výš je kruhový otvor pro přivedení termočlánků. Na levé straně jsou dva stejné kruhové otvory, ve kterých jsou

umístěny nerezové fitinky pro připojení hadiček chladicí sestavy. Dále se zde nachází jeden menší kruhový otvor pro přivedení napájecích vodičů k ventilátoru.

4.3.4 Chladicí sestava

Základem pro chladicí sestavu je hliníkový chladicí blok s ventilátorem a vodní chlazení. Na Obr. 4.19 je patrná celá konstrukce vnitřní části chlazení. Vlevo jsou hadičky propojené s chladicím prvkem, jehož měděná plocha je přilepena pomocí teplovodivé pasty k hliníkovému chladiči. Tato část je vpravo zakončena ventilátorem, který se roztočí po dosažení chladicí části pájecího cyklu a fouká směrem na vzorek. Všechny tři prvky této části jsou mechanicky spojeny pomocí šroubů.



Obr. 4.19: Část chladicí sestavy umístěné uvnitř pájecí stanice

Při návrhu zařízení bylo zamýšleno umístit vnitřní část chladicí sestavy na distanční sloupky tak, aby byla ve vodorovné poloze a střed ventilátoru se nacházel přibližně ve výšce pájeného vzorku. Při kompletaci zařízení bylo ale zjištěno, že pokud by se hadičky ohnuly do takového úhlu, aby byly zapojeny podle návrhu, došlo by k jejich výraznému zúžení a ztížení průchodu chladicí kapaliny. Následně bylo rozhodnuto umístit sestavu přímo na stínění, hadičky zapojit bez ohnutí a podložit ji tak, aby ventilátor mířil šikmo do prostoru mezi zářiče. Při následném testování teplotního profilu mezi zářiči bylo zaznamenáno nedostatečné chlazení vzorku po vypnutí zářičů a zapnutí ventilátoru. To bylo způsobeno rozptylem vzduchového proudu mimo požadovaný prostor z důvodu šikmého umístění sestavy. Aby se tento problém eliminoval, byl vyroben trychtýř z hliníkového plechu, který směřuje ventilátorem hnaný vzduch na požadované místo a minimalizuje míru rozptylu do okolních míst. Po proměření s tímto dodatečným prvkem bylo zjištěno výrazné zvýšení chlazení vzorku.

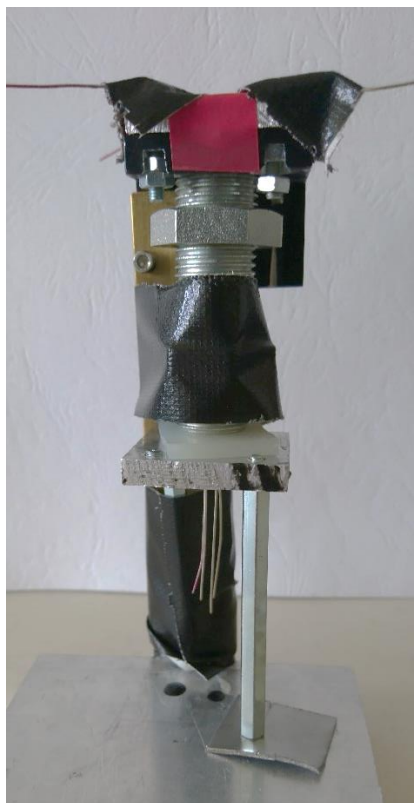
Vnější část chlazení sestává z vodní pumpy, ventilátoru a radiátoru. Kapalina je pumpou hnána do vnitřní části chlazení skrz první pár nerezových fitinek zašroubovaných v plexisklových stěnách, a poté skrz druhý pár fitinek opět ven, kde pokračuje do radiátoru chlazeného vnějším ventilátorem, a nakonec se vrací opět do pumpy. Všechny elektronické prvky chladicí sestavy, tedy pumpa a oba ventilátory, jsou napájeny jedním počítačovým zdrojem, ze kterého jsou využity tři konektory.

Před zašroubováním fitinek byly do plexisklových stěn vyvrtány odpovídající díry a závity. Konkrétně byl otvor vyvrtán vrtákem o průměru 11,7 mm a následně se do něj udělal závit G 1/4". Při vrtání do plexiskla se využilo vyztužených částí stěn, které mají tloušťku 50 mm a bylo nutné vrtat v kratších intervalech z důvodu vysoké teploty vrtáku a následného natavování plexiskla. Důraz musel být kladen také na přímé držení vrtáku tak, aby se v plexiskle nevzpříčil a nedošlo k prasknutí stěn. Jakmile byly otvory připraveny, závity fitinek se natřely silikonovou zalévací hmotou DC 1-2577, která slouží k utěsnění.

Propojení hadiček s pumpou, radiátorem a vnitřním chladicím blokem je provedeno pomocí dodaných spojek se závity. Pouze na fitinky jsou hadičky nasazeny a následně upevněny pomocí kovových šroubovacích obrouček.

4.3.5 Vakuové průchodky

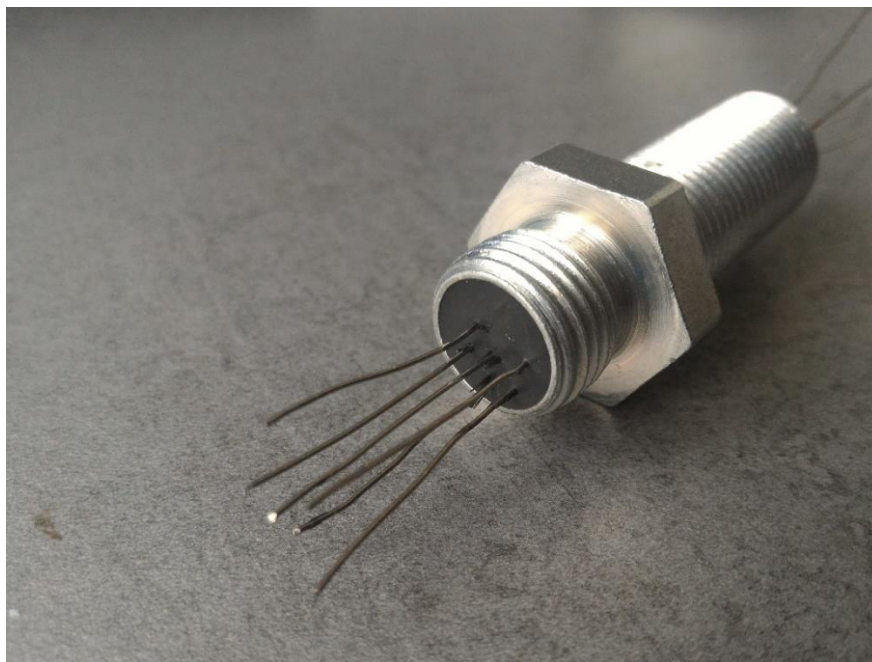
Vzhledem k vysokým cenám průchodek do vakua byly průchodky pro toto zařízení vyrobeny. Základ tvoří průchodka z pozinkované oceli s vnějším závitem M16x1,5 a vnitřním průměrem 8 mm. Ta byla uchycena ve vertikální poloze a podle šablony se skrz ni protáhly požadované odizolované vodiče tak, aby se nedotýkaly navzájem ani okolních stěn (Obr. 4.20). Po jejich vzájemném elektrickém proměření kvůli možným zkratům se celý objem průchodky zalil epoxidovou pryskyřicí typu MC35-W21. Samotná pryskyřice se musela nejdříve promíchat s tvrdidlem v poměru 100:9 hmotnostně nebo 100:14 objemově. Definitivní vytvrzení epoxidu nastalo po třiceti hodinách.



Obr. 4.20: Průchodka s tvrdnoucím epoxidem

Na Obr. 4.21 je zobrazena první vyrobená průchodka, kterou prochází tři páry termočlánekových drátů. V zařízení jsou použity celkem čtyři průchodky s vodiči. Jednou z nich jsou přivedeny čtyři napájecí vodiče k infračerveným zářičům. Ta druhá slouží pro napájecí vodiče k ventilátoru a jsou v ní ještě dva prozatím nepoužité, ke kterým bude možné připojit elektronický tlakový senzor. Zbývajících dvěma průchodkami bylo dohromady přivedeno pět párů drátů pro termočlánky typu K, tedy chromel – alumel.

Pro tyto průchodky byly vyvrtány otvory o průměru 14,5 mm, do kterých se poté vytvořily požadované závity M16x1,5. Při umísťování součástek bylo kromě silikonové zalévací hmoty použito i vnější kroužkové těsnění. Na Obr. 4.21 je výsledná průchodka se třemi páry termočlánekových drátů.



Obr. 4.21: Průchodka s termočlánkovými dráty

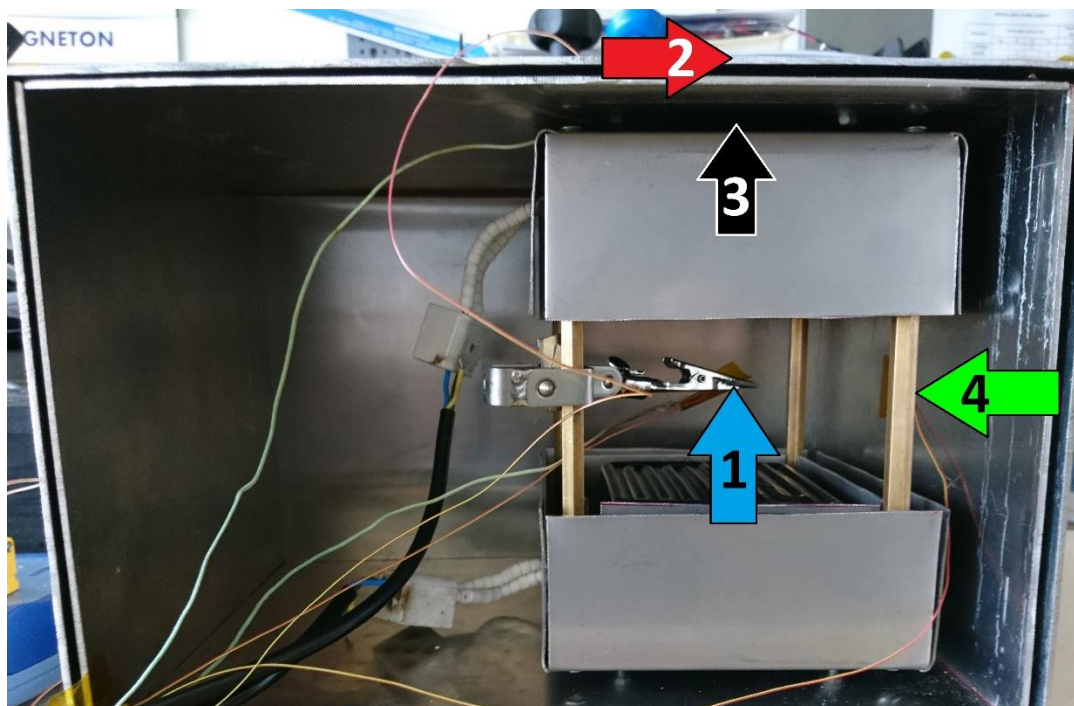
4.4 Funkce zařízení

V jednotlivých částech výrobního procesu a kompletace zařízení bylo nutné ověřit správnost dosavadního postupu a eliminovat případné budoucí nahromadění komplikací. Klíčové bylo ověření funkce stínění, následné proměření teplotního profilu při pájení a odzkoušení čerpání vakua a dusíku.

4.4.1 Ověření teplotních simulací

Po zkonstruování hliníkového stínění byla ověřena jeho funkčnost a nezbytnost v pájecím zařízení, kde slouží k odstínění ohřevné části od plexisklových stěn. Společně s již vyrobenou ohřevnou konstrukcí bylo umístěno do plexisklového boxu a byla provedena série pájecích procesů za současného měření teploty na klíčových místech. Měření probíhalo ještě před vyvrtáním děr a umístěním průchozích součástek, tudíž byly napájecí vodiče zářičů a termočlánkové dráty vyvedeny pootevřenými dvířky a otvory utěsněny pomocí kaptonové pásky. Při tomto měření byla použita první verze ohřevné konstrukce, která ale byla později upravena z důvodů svých větších rozměrů.

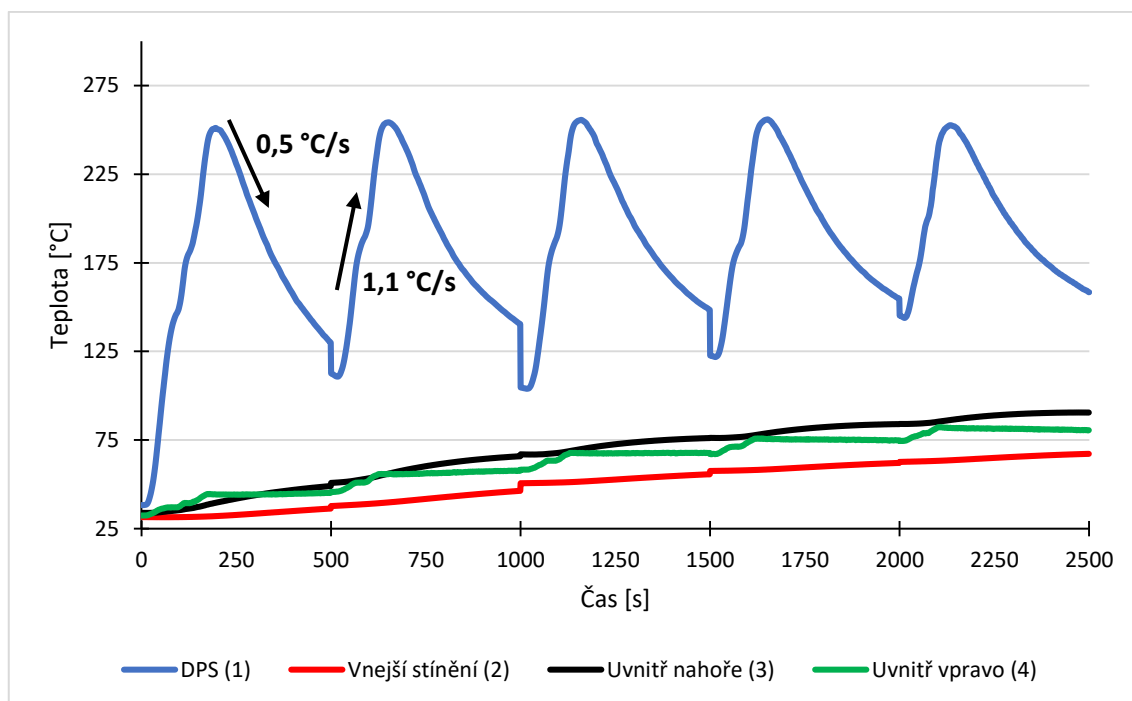
Na Obr. 4.22 je znázorněno umístění termočlánků, ohřevné části a stínění. Nejdůležitější bod je číslo 1, na jehož místě se nachází dva termočlánky. Jeden zaznamená teplotu desky plošných spojů a druhý jako zpětnovazební slouží k regulaci teploty infračervených zářičů. Termočlánek číslo 2 byl umístěn na vnější stínění nad ohřevnou konstrukcí a číslo 3 pod něj na vnitřní stínění. Číslo 4 se nachází na stěně vnitřního stínění.



Obr. 4.22: Umístění termočlánků při ověřování stínění

Postupně bylo změřeno pět pájecích cyklů po pěti stech sekundách a časové průběhy teplot byly jsou zaznamenány v Obr. 4.23. Teplotní profil neodpovídá požadovanému, a to z toho důvodu, že chlazení probíhalo pouze samovolně, a ne pomocí chladicí sestavy. Optimální profil podle katalogového listu pájky SAC305 od firmy NeVo má teplotní gradient ohřevu 1-2 °C/s a chlazení 1-6 °C/s. Rychlost ohřevu je tedy splněna, ale míra chlazení je nedostatečná, jelikož bylo dosaženo pouze poloviny minimální hodnoty [22].

Mezi každým procesem bylo měření teplot přerušeno, proto křivky nejsou spojitě. Z grafu je zřejmé, že teplota stínění v místě nad zářiči roste i po jejich vypnutí. To bylo způsobeno tím, že stínění je neustále zahříváno rozehřátou nosnou konstrukcí zářičů.



Obr. 4.23: Časový průběh teplot uvnitř pájecí pece

V Tab. 4.2 jsou uvedeny hodnoty teploty stínění po ukončení měření. Jak ukazuje termočlánek číslo 3, na vnitřním stínění byla konečná teplota 90 °C, což by v případě pouze jedné vrstvy stínění představovalo riziko překročení bodu skelného přechodu plexiskla (105 ± 20 °C). Na vnějším stínění je teplota pouze 67 °C, což už je přijatelná hodnota.

Tab. 4.2: Konečná teplota stínění po pátém pájecím cyklu

	Vnější stínění (2)	Uvnitř nahoře (3)	Uvnitř vpravo (4)
Teplota [°C]	67	90	80

Tímto měřením byly ověřeny závěry vyplívající z provedených simulací, a to konkrétně nezbytnost umístění hliníkové stínění, které slouží pro oddělení ohřevné konstrukce od plexisklových stěn. Při simulacích byla konečná teplota prostoru mezi vrchním stíněním a plexisklem 62 °C, v praxi byla ale měřena teplota stínění, která dosáhla hodnoty 67 °C. Jelikož teplota stínění v tomto místě musí být vždy vyšší než teplota prostoru nad ním, lze prohlásit hodnotu naměřenou za odpovídající hodnotě simulované. Naproti tomu teplota stínění na straně vedle ohřevné konstrukce byla při praktickém měření menší než teplota simulovaná. Při simulacích vyšla teplota prostoru mezi bočním stíněním a plexisklem 77 °C, při praktickém měření byla ale naměřena hodnota na vnitřním stínění v blízkosti ohřevné konstrukce 80 °C. Za předpokladu, že stínění bude mít stejné tepelně izolační vlastnosti i v tomto místě, bude na jeho vnější

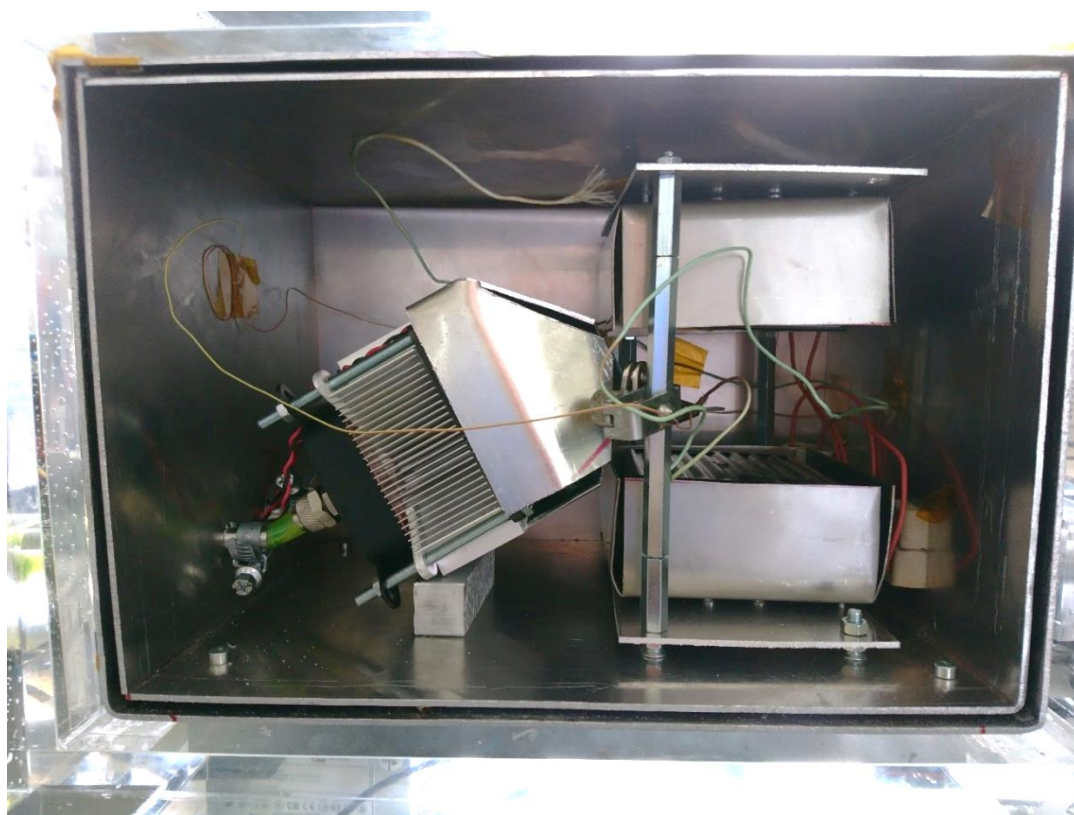
straně teplota jen asi 60 °C. Tento rozdíl oproti simulacím je pravděpodobně způsoben větší vzdáleností ohřevné konstrukce od stínění při praktickém měření. Proto byla pozornost směřována k vrchní části stínění i přesto, že v simulacích byla nejvyšší teplota zaznamenána na jeho pravé straně.

Dále se také potvrdilo, že dané stínění musí sestávat alespoň ze dvou vrstev hliníkového plechu oddělených vzduchovou mezerou, aby byl přenos tepla minimalizován.

4.4.2 Ověření funkčnosti – zapájení vzorku

Toto měření probíhalo až po kompletním sestavení pájecí stanice za přítomnosti všech funkčních a konstrukčních prvků. Blokové schéma zapojení je v příloze A. Cílem bylo zejména ověřit správnou funkci jednotlivých částí a výstupem jsou úspěšně zapájené kulové vývody.

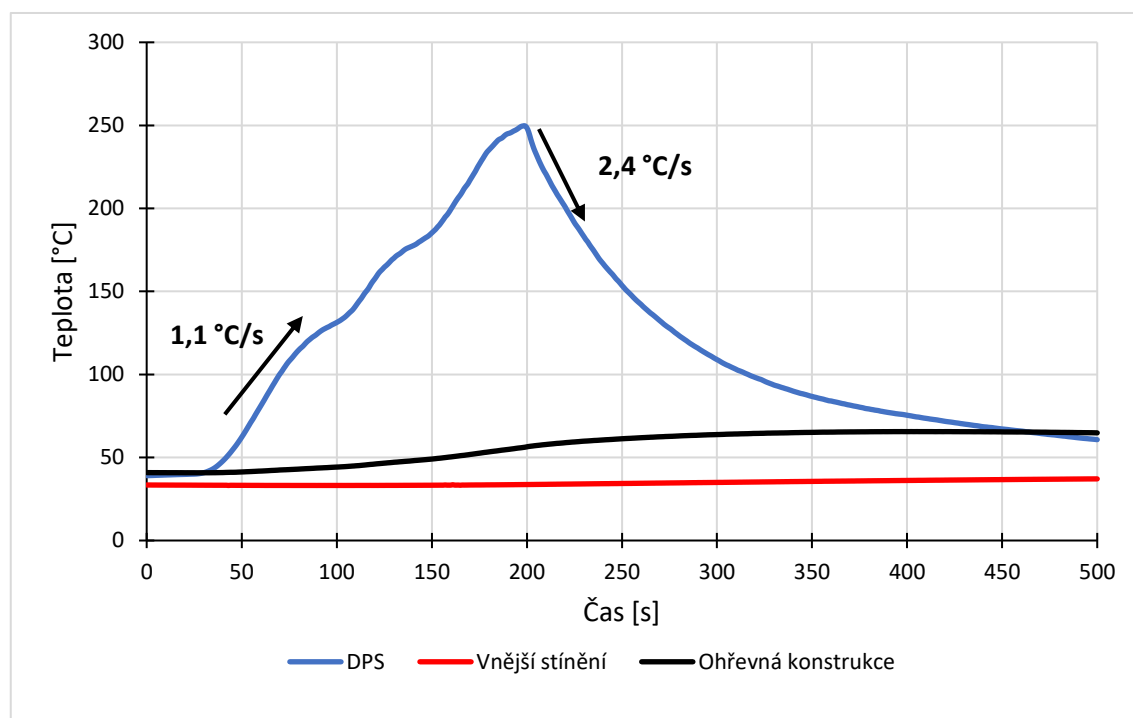
V průběhu prvotních měření bylo zjištěna nedostatečná míra chlazení vzorku po vypnutí topných těles, konkrétně se jednalo o hodnotu 1 – 1,2 °C/s. Aby se docílilo požadované hodnoty alespoň 2 °C/s, byl z hliníkového plechu vyroben směrovací trychtýř, aby byl chlazený vzduch přiveden na požadované místo mezi topnými tělesy, viz. Obr. 4.24.



Obr. 4.24: Pohled do zařízení s konečným umístěním prvků

Při tomto měření byly použity čtyři termočlánky typu K. Hodnoty teploty třech z nich byly zaznamenávány a ukládány a ten čtvrtý sloužil jako zpětnovazební pro regulaci spínání infračervených zářičů. Na regulátoru R500 byl nastaven již optimalizovaný teplotní profil pro bezolovnaté pájení a ten následně spíná topná tělesa tak, aby na zpětnovazebním termočlánku na substrátu byla požadovaná hodnota.

Na Obr. 4.25 jsou vyneseny časové průběhy teploty tří termočlánků uvnitř stanice při pájecím procesu. Modrá křivka značí teplotní profil na pájeném vzorku, jehož hlavní rozdíl oproti přechozímu měření bez chladicí sestavy je podstatný nárůst teplotního gradientu při chlazení vzorku. Cílová hodnota 2 °C/s byla dokonce překročena a po úpravě směrovacího trychtýře je pravděpodobné, že bude možné dosáhnout i hodnoty vyšší. Porovnání jednotlivých částí naměřeného a optimálního teplotního profilu je uvedeno v Tab. 4.3. Všechny dosažené parametry jsou v požadovaném rozmezí.



Obr. 4.25: Časový průběh teplot uvnitř pájecí stanice při pájecím procesu

Tab. 4.3: Porovnání optimálního a dosaženého teplotního profilu

Sledované parametry	Katalogový list [22]	Naměřené hodnoty
gradient ohřevu	1-2 °C/s	1,1 °C/s
gradient chlazení	1-6 °C/s	2,4 °C/s
čas předehřevu (155-185 °C)	30-120 s	32 s
čas nad teplotou 220 °C	30-100 s	39 s
vrcholová teplota	230-250 °C	249 °C

Zejména při opakovaných pájecích procesech je nutné sledovat hlídací termočlánek, v Obr. 4.25 značený červenou křivkou, který je umístěn na vnějším hliníkovém stínění nad ohřevnou konstrukcí. Od plexiskla jej dělí ještě asi 5 mm široká vzduchová mezera, ale i přesto by jeho teplota neměla přesáhnout minimální teplotu skelného plexiskla, tedy přibližně 80 °C. Během jednoho pájecího procesu vzrostla teplota stínění pouze o 4 °C a teplota ohřevné konstrukce o 25 °C. Pohled na úspěšně zapájený vzorek pod mikroskopem je na Obr. 4.26. Tento vzorek byl vytvořen z materiálu FR4. Pájecí plošky byly vytvořeny s povrchovou úpravou galvanické zlato. Použité pájkové kuličky byly průměru 760 µm ze slitiny SAC305. Tavidlo pro lepší smáčivost a umístění kuliček na pájecí plošky bylo SMC-08 od firmy Shenmao Technology Inc. (poskytnuto firmou NeVo GmbH).



Obr. 4.26: Zapájené kulové vývody na DPS

4.4.3 Čerpání pracovního prostoru

Samostatně byla vyzkoušena i možnost několikanásobného čerpání hrubého vakua a následného vpouštění dusíku. Při tomto měření byly připojeny všechny mechanické prvky zařízení, chyběla pouze výkonová a řídicí část, jelikož ty nemají vliv na utěsnění zařízení. Na plexisklových dvířkách je ve vyfrézované drážce uloženo kruhové gumové těsnění, které bylo před započítím čerpání namazáno krémem pro snížení třetí a lepší přilnutí. Propojení hadiček s vakuem a dusíkem bylo realizované pomocí mosazných spojek v plexisklových stěnách zařízení. Nejprve byl spuštěn ventil na čerpání vakua, jenž probíhalo až do hodnoty tlaku v zařízení -0,8 baru vůči okolnímu prostředí. Poté byl ventil uzavřen a do zařízení byl puštěn dusík pod tlakem 0,7 baru vůči okolnímu prostředí, až do dosažení atmosférického tlaku v zařízení. Tento postup byl proveden pětkrát za sebou, a poté byl místo přípojky s dusíkem připojen analyzátor zbytkového kyslíku (Ridzewsky Zr-Ox MK II), který naměřil koncentraci v atmosféře uvnitř zařízení 900 ppm. Tato hodnota zůstala konstantní po dobu deseti minut, což i s rezervou pokrývá pájecí proces.

5 ZÁVĚR

V teoretické části této práce byly přiblíženy principy pájení se zaměřením na pájení přetavením v ochranné dusíkové atmosféře a její výhody na kvalitu pájeného spoje a efektivitu výroby, zejména po vydání směrnice zakazující používání olova v běžné elektrotechnické výrobě.

Jelikož bude navrhované zařízení sloužit zejména pro reballing pouzder BGA, je zde uvedena jejich obecná charakteristika, stejně jako způsob jejich zapájení na desku plošných spojů a následná metoda kontroly pájených spojů. kulové vývody BGA pouzder mohou na desce plošných spojů podléhat mechanickému namáhání, např. vlivem ohybu desky a otřesů, proto je vhodné takto poškozená pouzdra odpájet a vytvořit nové kulové vývody. Tento proces je náročný vlivem mnoha faktorů, a proto je vhodné zlepšit podmínky pájení pomocí, např. dusíkové, ochranné atmosféry, čemuž slouží toto zařízení.

Experimentální část využívá poznatky z teoretické části. Zaměřuje se převážně na hrubý návrh pájecího zařízení v prostředí SolidWorks tak, aby byla konstrukce tohoto zařízení proveditelná a cenově dostupná. Finální návrh obsahuje všechny hlavní komponenty nacházející se v pracovním prostoru kromě termočlánků, jejichž umístění se bude měnit podle potřeby. Dále je také v modelu naznačeno umístění všech součástek, skrz které jsou mechanicky nebo elektricky propojeny komponenty uvnitř s vnějšími periferiemi (vodní pumpa, napájení ventilátoru, regulátor teploty infrazářičů, senzor teploty).

Na základě teplotních simulací počítaných nástrojem Flow Simulation programu SolidWorks byly některé prvky návrhu pozměněny a následně byla nezbytnost provedených změn ověřena praktickým měřením.

V konstrukční části jsou uvedeny postupy výroby jednotlivých prvků, jejich kompletace do funkčních částí a informace o jejich významu v zařízení při pájecím procesu. V průběhu výroby zařízení byly testovány některé jeho funkce a na závěr byly úspěšně zapájeny kulové vývody na desku plošných spojů. Teplotní profil z tohoto pájení je zaznamenán v grafu a jeho teplotní gradienty v průběhu ohřevu a chlazení odpovídají požadovaným pro daný typ pájecí slitiny a DPS.

LITERATURA

- [1] Solder Reflow Assembly Instructions. VISHAY, RFCS. [online]. [cit. 19. listopadu 2017]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/61101/rfcssolder.pdf>
- [2] M. ADÁMEK, C. VAŠKO, M. DRLÍK. Pájení v elektrotechnické výrobě, Kontrola jakosti spojů. *Laboratorní cvičení*. [cit. 24. listopadu 2017] Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/L04b_p%C3%A1jen%C3%AD_a_kontrola.pdf
- [3] A. MACKIE. Dispelling 10 Myths about Nitrogen Reflow (part I) [online]. [cit. 21. listopadu 2017]. Dostupné z: <http://www.indium.com/blog/dispelling-10-myths-about-nitrogen-reflow-part-i.php>
- [4] P. ŠEFARA. Výzkum spolehlivosti pájených spojů v dusíkové atmosféře: diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2015. 73 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.
- [5] Usage of Nitrogen for Reflow Process for Pb-Free Assembly. NexLogic [online]. [cit. 22. listopadu 2017]. Dostupné z: <http://www.nexlogic.com/pb-free/assembly/nitrogen-reflow/>
- [6] J. WU, G. K. ARSLANIAN, E. TAN. Benefits of Inert Gas Soldering for Printed Circuit Board Assembly Processes [online]. Air Products and Chemicals, inc., 2014 [cit. 30. listopadu 2017]. Dostupné z: <http://www.airproducts.com/~media/Files/PDF/microsites/reflow-solder/benefits-of-inert-gas-soldering.pdf?la=en>
- [7] X. GUI, Z. ZHANG, L. XU a S. LIU, "Investigation of reflow soldering under nitrogen atmosphere," 2012 13th International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, Guilin, Guangxi, China, IEEE, 2012, s. 861-865. E-ISBN: 978-1-4673-1680-4. DOI: 10.1109/ICEPT-HDP.2012.6474747. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6474747&isnumber=6474554>
- [8] I. POOLE. Ball Grid Array, BGA. Radio-Electronics [online]. [cit. 22. listopadu 2017]. Dostupné z: <http://www.radio-electronics.com/info/data/smt/smd-bga-ball-grid-array-package.php>
- [9] Renesas Electronics America. Digi-Key [online]. R7S721001VLBG#AC0 [cit. 25. listopadu 2017]. Dostupné z: <https://www.digikey.com/product-detail/en/renesas-electronics-america/R7S721001VLBG-AC0/R7S721001VLBG-AC0-ND/5356581>
- [10] I. POOLE. BGA solder proces and soldering BGA components. Radio-Electronics [online]. [cit. 22. listopadu 2017]. Dostupné z: <http://www.radio-electronics.com/info/manufacture/soldering/smt-soldering/bga-solder.php>

- [11] Simple BGA Reballing. Instructables [online]. [cit. 26. listopadu 2017]. Dostupné z: <http://www.instructables.com/id/Simple-BGA-Reballing>
- [12] BGA Reballing. Finetech. [online]. [cit. 8. prosince 2017] Dostupné z: <http://eu.finetech.de/advanced-rework/processes/bga-reballing.html>
- [13] Reballing with direct heat stencils. Chiptronics [online]. [cit. 26. listopadu 2017]. Dostupné z: <http://chiptroniks.com/2012/05/reballing-with-direct-heat-stencils/>
- [14] EZReball Reballing Preforms – BGA Reballing. Business Electronics Soldering Technologies [online]. [cit. 28. listopadu 2017]. Dostupné z: <http://www.solder.net/products/ezreball>
- [15] BGA Laser Reballing. Retronix [online]. [cit. 28. listopadu 2017]. Dostupné z: <http://www.retronix.com/laser-bga-reballing>
- [16] J. STARÝ, P. KAHLE. Plošné spoje a povrchová montáž. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005. 208 s.
- [17] HB-Automation. Direct Industry [online]. [cit. 29. listopadu 2017]. Dostupné z: <http://trends.directindustry.com/hb-automation/project-118287-135600.html>
- [18] Reflow oven 4SOLDER. MIPEC [online]. [cit. 29. listopadu 2017]. Dostupné z: <http://www.webshop.mipex.eu/Reflow-oven-4SOLDER-d78.htm?tab=description>
- [19] MARTIN's Mini-Oven for Reballing and Solder Bumping. MARTIN [online]. [cit. 8. prosince 2017]. Dostupné z: <http://www.martin-smt.de/en/company/news-events/press-informations/news-detail/article/martins-mini-oven-for-reballing-and-solder-bumping.html>
- [20] Vacuum Levels of Acrylic Vacuum Chambers. Sanatron, LLC [online]. [cit. 26. května 2018]. Dostupné z: <https://sanatron.com/articles/vacuum-levels-of-acrylic-vacuum-chambers.php>
- [21] Vapour pressure of water. Wikipedia [online]. [cit. 26. května]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Vapour_pressure_of_water
- [22] Lead-Free Solder Paste PF606-P25. Nevo [online]. [cit. 30. května]. Dostupné z: <http://www.nevo-solder.com/wp-content/uploads/PF606-P25TDS-V02-01.pdf>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

BGA	typ pouzdra s kulovými vývody (Ball Grid Array)
CSP	typ pouzdra, jehož plocha nepřesahuje 1,2násobek plochy čipu (Chip Scale Package)
DPS	deska plošných spojů
SMT	povrchová montáž (Surface Mount Technology)
RSS	teplotní profil s vyrovnaním teploty (Ramp Soak Spike)
RTS	teplotní profil s lineárním ohřevem (Ramp To Spike)
QFP	typ pouzdra s vývody na všech čtyřech stranách (Quad Flat Package)
LGA	typ pouzdra s vývodovými ploškami na připojení pinů na spodní straně (Land Grid Array)
CAD	počítačem podporované projektování (Computer-Aided Design)
ε	emisivita

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Teplotní profil s vyrovnaním teploty – <i>Ramp Soak Spike</i> [2]	10
Obr. 1.2: Teplotní profil s lineárním ohřevem – <i>Ramp To Spike</i> [2]	11
Obr. 2.1: Příklad pouzdra FBGA (Fine Pitch Ball Grid Array) [9]	13
Obr. 2.2: Odstraňování kulových vývodů z BGA pouzdra [11]	15
Obr. 2.3: Hlavice sloužící k bezkontaktnímu tavení a odsávání pájky [12]	16
Obr. 3.1: Průtažná přetavovací pec, výrobce HB – Automation [17]	18
Obr. 3.2: Vsázková přetavovací pec MIPEC 4SOLDER [18]	19
Obr. 3.3: Pájecí pec MARTIN's MINIOVEN 04 [19]	20
Obr. 4.1: CAD model – Pohled zepředu na pájecí pec	21
Obr. 4.2: CAD model – Pohled zepředu na průřez pájecí pecí	22
Obr. 4.3: CAD model – Pootočený nadhled na levou stranu zařízení; 1. průchodka na vodiče, 2. fitinky, 3. přípojka na vakuum a dusík	23
Obr. 4.4: CAD model – Průchodka z pozinkované oceli	23
Obr. 4.5: CAD model – Nerezová fitinka	24
Obr. 4.6: CAD model – Mosazná přípojka	24
Obr. 4.7: CAD model – Pootočený nadhled na pravou stranu zařízení; 1. průchodka na vodiče, 2. průchodky na termočláňkové dráty, 3. mosazná přípojka, 4. páčky na uzavírání zařízení	25
Obr. 4.8: CAD model – Pouzdro na termočláňky; a) kruhový otvor k upevnění na průchodku b) obdélníkový otvor na tři termočláňkové konektory	26
Obr. 4.9: CAD model – Chladicí sestava; 1. fitinka, 2. hadička, 3. chladicí blok sestavy Magicool, 4. chladič, 5. ventilátor	27
Obr. 4.10: CAD model – Hliníkový chladič (tzv. <i>heat sink</i>)	27
Obr. 4.11: CAD model – Chladicí blok sestavy Magicool; a) horní strana s otvory na hadičky b) měděná ploška na spodní straně	28
Obr. 4.12: CAD model – Ohřevná část; a) pohled zvenku b) viditelná vnitřní struktura	28
Obr. 4.13: CAD model – Hliníkové stínění s odnímatelnou přední stěnou	29

Obr. 4.14: Teplotní simulace bez ventilátoru; $T_1 = 323\text{ K}$, $T_2 = 436\text{ K}$, $T_3 = 383\text{ K}$	31
Obr. 4.15: Teplotní simulace se spuštěným ventilátorem, čelní pohled; $T_1 = 335\text{ K}$, $T_2 = 460\text{ K}$, $T_3 = 350\text{ K}$	31
Obr. 4.16: Teplotní simulace se spuštěným ventilátorem, boční pohled; $T_1 = 338\text{ K}$, $T_2 = 352\text{ K}$	32
Obr. 4.17: Teplotní simulace s ohřevnou deskou bez spuštěného ventilátoru.....	33
Obr. 4.18: Konstrukce s topnými tělesy; 1. nerezový kryt, 2. propojovací svorka, 3. otočný distanční sloupek na uchycení vzorku	35
Obr. 4.19: Část chladicí sestavy umístěné uvnitř pájecí stanice	36
Obr. 4.20: Průchodka s tvrdnoucím epoxidem	38
Obr. 4.21: Průchodka s termočládkovými dráty	39
Obr. 4.22: Umístění termočládků při ověřování stínění	40
Obr. 4.23: Časový průběh teplot uvnitř pájecí pece	41
Obr. 4.24: Pohled do zařízení s konečným umístěním prvků	42
Obr. 4.25: Časový průběh teplot uvnitř pájecí stanice při pájecím procesu	43
Obr. 4.26: Zapájené kulové vývody na DPS	44

SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1: Parametry materiálů použitých při simulacích	30
Tab. 4.2: Konečná teplota stínění po pátém pájecím cyklu	41
Tab. 4.3: Porovnání optimálního a dosaženého teplotního profilu.....	43

A BLOKOVÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ ELEKTRICKÉHO A CHLADICÍHO OKRUHU

